

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ACTIVITÉ DES CYCLONES EXTRA-TROPICAUX SIMULÉS PAR LE
MODÈLE COUPLÉ CANADIEN DE CIRCULATION GÉNÉRALE (MCCG3)

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR
MILKA RADOJEVIC

NOVEMBRE 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Le présent travail est avant tout la suite d'une aventure collective impliquant plusieurs personnes. Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le regretté, le professeur à l'UQÀM, M. Peter Zwack, pour avoir accepté de diriger mon projet de maîtrise. Un merci tout à fait spécial à M. René Laprise, le professeur à l'UQÀM, pour avoir agi à titre d'examineur de ce mémoire. Grâce à son appui indispensable, j'ai réussi à réaliser mon rêve.

Je tiens à remercier le Département des Sciences de l'Atmosphère à l'UQÀM pour l'aide financière accordée pendant mes études de maîtrise. J'aimerais exprimer ma reconnaissance à la compagnie Hydro-Québec pour m'avoir fourni son support financier tout au long de ce projet, et également au Consortium Ouranos pour avoir me fourni des conditions de travail très agréables.

Ce projet n'aurait pas été possible sans un algorithme automatisé de M. Mark R. Sinclair, le professeur à l'Université aéronautique Embry-Riddle, Arizona. D'autre part, le travail de Mme Corina Rosu représentait la base précieuse pour ce projet. Un merci exceptionnel à l'équipe de simulations climatiques MRCC, en particulier à Mme Anne Frigon, M. Michel Giguère et M. Yanjun Jiao. Je voudrais remercier mes collègues, Ivana, Saskia et Leo, pour leur amitié et leur soutien depuis mon arrivée à Montréal.

À ma mère, Radmila, et à mon frère, Dusan, qui me soutiennent sans réserve !

À mon père, Slobodan Radojevic, disparu trop tôt !

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ACRONYMES	xi
LISTE DES SYMBOLES.....	xii
RÉSUMÉ	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE	10
1.1 Cyclones dans l’algorithme de Sinclair	10
1.2 Données d’entrée dans l’algorithme de Sinclair.....	16
1.3 Traitement statistique.....	18
CHAPITRE II	
VALIDATION DU MODÈLE MCCG3	24
2.1 Densité des trajectoires des cyclones.....	25
2.2 Vitesse de déplacement (caractéristique).....	29
2.3 Vent de gradient : tourbillon et circulation (caractéristique)	31
2.4 Vapeur d’eau précipitable caractéristique.....	32
2.5 Signal des phénomènes climatiques.....	33
CHAPITRE III	
Évolution des cyclones dans le futur	51
3.1 Cyclones d’hiver (NDJFMA).....	52
3.2 Activité des cyclones en novembre et en avril	57

CONCLUSION	79
APPENDICE A	
CALCUL DE ζ_{GR} DANS L'ALGORITHME DE SINCLAIR.....	83
APPENDICE B	
ÉVOLUTION FUTURE DES CYCLONES ESTIVAUX	85
APPENDICE C	
VALIDATION : NOVEMBRE ET AVRIL	91
APPENDICE D	
NORTHERN HEMISPHERE EXTRA-TROPICAL CYCLONE ACTIVITY IN 1961-1990: COMPARISON OF THE CGCM3 WITH THE NCEP/NCAR REANALYSES	102
APPENDICE E	
IMPACT OF ENHANCED GREENHOUSE GASES ON NORTHERN HEMISPHERE EXTRA-TROPICAL CYCLONE ACTIVITY IN 2041-2070 AS SIMULATED BY THE CGCM3.....	109
BIBLIOGRAPHIE.....	116

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 1.1 1 :	
Champ d' <i>EP</i> (en couleur) et le champ de ζ_{gr} à 1000 hPa (en ligne rouge) : (a) 12UTC Novembre 05 1989, (b) 18 heures plus tard. Les contours sont tracés à tous les $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour ζ_{gr} , avec des valeurs positives en trait plain, et à chaque 0,5 cm pour <i>EP</i>23	
Figure 2.1.1 :	
Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.36	
Figure 2.1.2 :	
Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....37	
Figure 2.1.3 :	
V_{cyc} caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....38	
Figure 2.1.4 :	
ζ_{gr} caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à chaque $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (a), (b) et (c), et à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (d), (e) et (f), avec les valeurs négatives en traits tiretés.....39	

- Figure 2.1.5 : C_{gr} caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....40
- Figure 2.1.6 : EP caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à chaque 5 mm, avec les valeurs négatives en traits tiretés. .41
- Figure 2.1.7 a : Indice d'hiver (décembre à mars) du NAO, de 1960 à 1990. (Le graphe est construit d'après les données extraites du site Internet de l'UCAR : www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell).42
- Figure 2.1.7 b : Indice multivariable du SO (en rouge pour les MEI positifs et en bleu pour les MEI négatifs). (Le graphe est pris du site Internet du NOAA Climate Diagnostics Center : www.cdc.noaa.gov/ENSO)..42
- Figure 2.1.8 a : Densité typique des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) en : (a) phase positive du NAO, (b) phase négative du NAO, (c) différence entre (a) et (b). Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires pour (a) et (b), et de 2 trajectoires pour (c) par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....43
- Figure 2.1.8 b : Densité typique des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) en : (a) phase positive du SO (La Niña), (b) phase négative du SO (El Niño), (c) différence entre (a) et (b). Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires pour (a) et (b), et de 2 trajectoires pour (c) par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.44
- Figure 2.2.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones estivaux (MJJASO), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.45

- Figure 2.2.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones estivaux (MJJASO), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....46
- Figure 2.2.3 : V_{cyc} caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....47
- Figure 2.2.4 : ζ_{gr} caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à chaque $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (a), (b) et (c), et à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (d), (e) et (f), avec les valeurs négatives en traits tiretés.....48
- Figure 2.2.5: C_{gr} caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....49
- Figure 2.2.6 : EP caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (d) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à chaque 5 mm, avec les valeurs négatives en traits tiretés. .50
- Figure 3.1.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à toutes les 3 trajectoires (a)-(b), et à l'intervalle de 1 trajectoire (c) par cercle de rayon de 333 km par saison, avec les valeurs négatives en traits tiretés.62
- Figure 3.1.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire par cercle de rayon de 333 km par saison, avec les valeurs négatives en traits tiretés.63

- Figure 3.1.3 : V_{cyc} caractéristique pour NDJFMA : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} pour (a)-(b), et à tous les 5 km h^{-1} pour (c) à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....64
- Figure 3.1.4 : ζ_{gr} caractéristique pour NDJFMA : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.....65
- Figure 3.1.5 : C_{gr} caractéristique pour NDJFMA : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.....66
- Figure 3.1.6 : Distribution du nombre de cyclones hivernaux en fonction de (a) les valeurs centrales de ζ_{gr} , (b) les valeurs centrales de P_{NM} , et (c) de C_{gr} , pour le secteur d'intérêt situé dans la région du golfe du Saint Laurent (1961 à 1990). Les lignes plaines correspondent aux simulations du MCCG3, et les lignes tiretées joignent les réanalyses ERA-40.67
- Figure 3.1.7 : Distribution du nombre de cyclones hivernaux en fonction de (a) les valeurs centrales de ζ_{gr} , (b) les valeurs centrales de P_{NM} , et (c) de C_{gr} , pour le secteur d'intérêt situé dans la région du golfe du Saint Laurent. Les lignes plaines correspondent aux simulations (1961 à 1990), et les lignes pointillées aux projections (2041 à 2070) du MCCG3.68
- Figure 3.2.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones en novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire pour (a) et (b), et de 0,5 trajectoire pour (c) par cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....69
- Figure 3.2.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclone en novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par le cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.70

- Figure 3.2.3 : V_{cyc} caractéristique pour novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.71
- Figure 3.2.4 : ζ_{gr} caractéristique pour novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....72
- Figure 3.2.5 : C_{gr} caractéristique pour novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a)-(b), et à chaque $1 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.....73
- Figure 3.3.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones en avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire pour (a) et (b), et de 0,5 trajectoire pour (c) par cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.....74
- Figure 3.3.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones en avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.75
- Figure 3.3.3 : V_{cyc} caractéristique pour avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.76
- Figure 3.3.4 : ζ_{gr} caractéristique pour avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.77
- Figure 3.3.5 : C_{gr} caractéristique pour avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $1 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.....78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 3.1.1 : La statistique du Khi-carré (χ^2) : la validation du MCGG3 et le changement dans le futur concernant la distribution (sans prendre en compte le début et la fin) du nombre de centres cycloniques en fonction de ζ_{gr} et de P_{NM} et de C_{gr} ; dl est le degré de liberté.	56
Tableau 3.1.2 : Le minimum, le quartile inférieur (Q1), la médiane, le quartile supérieur (Q3), le maximum et l'écart interquartile (Q3-Q1) : la distribution du nombre de centres cycloniques (en hiver sur le Golfe du Saint-Laurent) en fonction de ζ_{gr} et de P_{NM} et de C_{gr}	56

LISTE DES ACRONYMES

CU	Circulation Unit
CVU	Circulation Vorticity Unit
D_t	Densité des trajectoires des cyclones
ERA-40	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 40-year Re-analysis project
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
MCG	Modèle de circulation générale
MCCG2	Modèle Couplé Canadien de Circulation générale de deuxième génération
MCCG3	Modèle Couplé Canadien de Circulation générale de troisième génération
UQÀM	Université du Québec à Montréal

LISTE DES SYMBOLES

C_{gr}	circulation du vent de gradient ($m^2 s^{-1}$)
EP	vapeur d'eau précipitable (mm)
H_0	orographie (gpm)
H	hauteur du géopotentiel (gpm)
P_{NM}	pression au niveau moyen de la mer (hPa)
r	rapport de mélange ($g kg^{-1}$)
R	constante spécifique de l'air humide ($J kg^{-1} K^{-1}$)
R_d	constante de l'air sec ($287 J kg^{-1} K^{-1}$)
V_{cyc}	vitesse de déplacement des cyclones ($km h^{-1}$)
V_g	vitesse du vent géostrophique ($m s^{-1}$)
V_{gr}	vitesse du vent du gradient ($m s^{-1}$)
Φ	géopotentiel ($J kg^{-1}$)
$\Delta\Theta$	un incrément azimutal (0,3496 radian)
ΔR	un espace radial (111,1 km)
χ^2	Khi-carré (sans unité)
σ	écart-type de la densité des trajectoires des cyclones (sans unité)
ζ_{gr}	tourbillon du vent de gradient (s^{-1})

RÉSUMÉ

Les cyclones extra-tropicaux constituent un élément important du climat, particulièrement dans les régions continentales situées aux latitudes moyennes et élevées. Selon les études basées sur l'usage des modèles mondiaux du climat, une hausse de la concentration du CO₂ pourrait mener à un abaissement du nombre de cyclones extra-tropicaux et à un renforcement de leur intensité.

Le but de ce projet a été d'examiner l'effet du changement climatique sur le comportement des cyclones tels que simulés par le modèle couplé (atmosphère-océan) canadien (MCCG3). L'approche utilisée ici afin d'accomplir les objectifs est la suivante. D'abord, les cyclones extra-tropicaux ont été identifiés et tracés, aux 6 heures, à l'aide de l'algorithme de Sinclair (1997). Par la suite, les statistiques d'un ensemble de trajectoires sur 30 ans simulés sont calculées.

Dans le cadre de l'évaluation du MCCG3, l'analyse a été effectuée pour la période de 1961 à 1990, dans l'hémisphère Nord (au nord du 20°N). En général, nous avons constaté que les résultats du MCCG3 concordent très bien avec ceux des ré-analyses ERA-40. Par contre, la comparaison entre les statistiques calculées sur la période du climat récent et celles du climat futur (2041 à 2070), a montré qu'il n'y a pas de changements importants de l'activité des cyclones hivernaux en Amérique du Nord, en réponse aux changements climatiques.

Mots clés : cyclones, tourbillon, trajectoires, ré-analyses, modèle, climat, variabilité.

INTRODUCTION

Les cyclones extra-tropicaux dans l'atmosphère entraînent un transport méridien considérable de quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité. Ainsi, le temps journalier et le climat à l'extérieur des régions équatoriales sont influencés par le passage de ces systèmes synoptiques, souvent associés aux bandes de précipitations continues. Ils peuvent apporter en effet, selon les saisons, de la pluie, de la neige, de la pluie verglaçante et des forts vents.

Le Québec constitue une région climatique où les précipitations abondantes sous forme de neige s'accumulent pendant les mois les plus froids de l'année. Lors de la fonte, au printemps, ce volume d'eau devient disponible pour l'exploitation et entre autres pour la génération d'hydroélectricité. Depuis deux décennies, les rivières qui alimentent les centrales de la compagnie Hydro-Québec affichent une baisse du débit d'eau. En fait, il s'agit d'une réduction d'environ 10 % par rapport à la moyenne des années antérieures. Ce manque d'eau dans les réservoirs a résulté en des milliards de dollars de vente d'électricité perdue. Est-ce que cette baisse d'apports naturels d'eau sera une tendance dans le futur ? L'étude de Rosu (2005) a démontré que les débits d'eau est en hausse générale lorsque la fréquence des cyclones augmente.

Les variations statistiquement significatives de l'état moyen du climat ou de sa variabilité peuvent être tant naturelles que d'origine humaine. Les répercussions des activités humaines incluent une augmentation assez importante de concentration atmosphérique des gaz qui intensifie l'effet de serre naturel. Parmi les principaux gaz à effet de serre (GES) figurent la vapeur d'eau, le méthane, l'oxyde nitreux ainsi que les gaz qui demeurent dans l'atmosphère pour de très longues périodes de temps (par exemple, le dioxyde de carbone CO_2). Les scénarios de l'évolution future d'émissions des GES et des aérosols reposent sur des hypothèses concernant l'évolution socio-

économique et technologique à venir. Il est possible d'examiner la réaction éventuelle du système climatique à des scénarios de forçage à l'aide des modèles de circulation générale (MCG). En général, ces modèles numériques englobent un MCG atmosphérique, un MCG océanique, un modèle de glace marine et des schémas de processus terrestres de surface. Bien qu'ils se caractérisent comme étant des outils fondamentaux pour construire des projections du climat, ils comportent de nombreuses limitations. Afin de découvrir et de comprendre leurs forces et faiblesses, il faut valider leurs simulations aux observations ainsi qu'aux autres modèles ; d'une part, pour mener les études concernant par exemple, la représentation des cyclones extra-tropicaux, et d'autre part, pour élaborer de véritables outils de prévision.

Le scénario de changement à l'échelle globale causé par le renforcement de l'effet de serre est basé sur les études effectuées à l'aide des MCG. Le réchauffement accru de la basse troposphère devrait être plus grand dans les régions polaires que dans les tropiques, plus grand sur les continents que sur les océans et plus grand en hiver qu'en été (IPCC, 2001). En conséquence, le transfert méridien de chaleur dans l'atmosphère pourrait être altéré de manière à réduire le gradient méridien de température et ainsi résulter en une réduction du nombre de cyclones extra-tropicaux. Aussi, une hausse de la température de surface pourrait favoriser l'évaporation et donc le dégagement de chaleur latente, de sorte que les cyclones pourraient devenir plus intenses. Selon les projections, en moyenne et à l'échelle du globe, la vapeur d'eau, l'évaporation et les précipitations devraient augmenter (IPCC, 2001).

La présente étude porte sur la variabilité des trajectoires des cyclones extra-tropicaux près de surface dans l'hémisphère Nord. La variabilité se rapporte surtout à des variations interannuelles des mesures visant à caractériser l'activité cyclonique sur une période de 30 ans. L'approche adoptée ici est celle qui a été proposée par Sinclair et Watterson (1999). Elle consiste à identifier les cyclones extra-tropicaux et à suivre leur déplacement à l'aide de l'algorithme de Sinclair (1997), et puis à générer

la statistique (moyenne et écart-type) d'un ensemble de trajectoires. La stratégie proposée se fonde sur les simulations du Modèle Couplé de Circulation Générale de troisième génération du CCmaC¹ (MCCG3). La composante atmosphérique du MCCG3 est un modèle spectral (MCGA3). Il opère à une résolution horizontale qui comprend un développement en harmoniques sphériques avec troncature triangulaire au nombre d'onde 47 (T47). À la verticale, MCGA3 possède 32 niveaux hybrides avec un plafond à 1 hPa.

Ce projet vise deux objectifs principaux concernant la climatologie des cyclones reliés aux trajectoires de la saison d'hiver boréal, de novembre à avril. Le premier consiste à examiner l'habileté de MCCG3 à reproduire les cyclones extra-tropicaux dans une période récente du climat. Le second concerne le changement projeté de l'activité cyclonique en réponse à l'effet accru des GES par MCCG3.

Dans le cadre de l'évaluation de MCCG3, nous proposons de valider ce modèle avec les ré-analyses atmosphériques et aussi de déterminer des différences par rapport à sa version précédente, MCCG2 (Flato and Boer, 2001). Les ré-analyses que nous utiliserons sont celles du ERA-40 (Kållberg et al., 2005), réalisées par European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Le Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) recommande d'adopter comme la plus récente période climatique sur 30 ans, celle de 1961 à 1990. Cette période est représentative du climat moyen récent dans la région en question et offre une durée suffisante pour englober une gamme de variations climatiques.

Afin de décrire l'évolution effective du climat dans l'avenir, nous allons suivre un scénario spécifique d'émissions de GES et d'aérosols. Nous disposons les simulations du MCCG3 couvrant la période de 2041 à 2070, selon le scénario A2 publié dans SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (source : www.grida.no).

¹ Centre Canadien de modélisation et d'analyse du Climat

Ce scénario correspond à la continuité de la situation des dernières décennies avec des émissions de CO_2 qui continuent à croître de façon exponentielle. En conséquence, le taux de CO_2 atteint, vers 2050, le double de sa concentration avant la révolution industrielle.

L'algorithme de Sinclair (1994, 1997) permet, de manière automatisée, à partir des séries aux 6 heures, d'identifier et de suivre, les centres des cyclones extra-tropicaux et de déterminer leur circulation. Le centre des cyclones se définit comme étant le maximum local dans le champ de tourbillon du vent de gradient à 1000 hPa (ζ_{gr}), comparativement aux 8 points voisins de grille. Pour qu'un point de grille soit choisi, il est également exigé que la valeur de ζ_{gr} y correspondant soit plus grande ou égale à $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (i.e., 2,5 CVU; « Circulation Vorticity Unit », en anglais). Le vent du gradient (V_{gr}) se désigne comme une relativement bonne approximation du vent réel. Le tourbillon du vent géostrophique se corrige alors par ajustement du terme de correction de courbure des isohypses. Puisque le paramètre de Coriolis tend vers zéro près de l'équateur, l'approximation du vent de gradient ne s'applique qu'aux latitudes supérieures à 20 degrés. Identifier un cyclone signifie ici spécifier principalement la position de son centre et la valeur correspondante de ζ_{gr} . Mais aussi, il est possible d'ajouter d'autres paramètres comme les valeurs correspondantes de pression au niveau moyen de la mer (P_{NM}), de circulation du vent de gradient (C_{gr}). Selon Sinclair (1997), la circulation cyclonique est une mesure la plus réaliste de l'intensité des cyclones car elle tient compte de la taille du système et de la vitesse de rotation des vents. Nous ajoutons la vapeur d'eau précipitable qui permettrait de décrire la quantité de vapeur d'eau atmosphérique associée aux cyclones.

L'usage du tourbillon a montré certains avantages par rapport à l'approche traditionnelle. Les centres cycloniques, identifiés par un minimum local de pression, favorisent les systèmes moins mobiles et plus profonds. Ainsi, les systèmes de rotation rapide, ceux dont le minimum de P_{NM} ne peut pas être détecté, peuvent être

manqués. Le maximum local du tourbillon est par contre un critère moins restrictif en montrant une bonne concordance avec la présence des nuages sur les images satellitaires. L'usage du tourbillon pénalise les centres de faible rotation qui ne pourraient être détectés par un minimum local de P_{NM} . Ces petites perturbations peuvent désigner les phases préliminaires du développement de grands cyclones. Les extrêmes du tourbillon sont sensibles au choix d'une grille très fine qu'en résulte l'apparition de faibles perturbations atmosphériques.

La stratégie employée pour suivre les trajectoires des centres identifiés suit presque celle de Murray et Simmonds (1991a). En fait, il s'agit d'associer les cyclones identifiés à un temps d'archive avec ceux qui sont à l'archive suivante. La procédure consiste d'abord à extrapoler chacun des centres dans le temps en fonction des tendances de déplacements de ζ_{gr} et de P_{NM} et du vent à 500 hPa. La poursuite du schéma se fonde sur le principe d'association entre un centre extrapolé et chacun des centres identifiés au pas de temps suivant dans l'entourage de ce centre extrapolé. La combinaison des paires est déterminée de façon à minimiser la somme des écarts absolus de position de ζ_{gr} et de P_{NM} par rapport aux valeurs extrapolées.

Les cyclones mobiles contribuent le plus fortement sur le climat. Ainsi, il faudra éviter les cyclones stationnaires du traitement statistique. Le choix des critères influence beaucoup la taille d'un ensemble de cyclones ou de leurs trajectoires. Sinclair et Watterson (1999) ne prennent en considération que les cyclones qui traversent au moins 1200 km et qui parcourent au moins 500 km sur les continents. D'autre part, Hoskins et Hodges (2002) traitent les cyclones ayant au moins une durée de vie de 2 jours et qui traversent plus de 1000 km. Dans notre étude, les critères imposés comprennent : i) une longévité minimale des cyclones est de 1 jour, ii) une longueur minimale des trajectoires est de 1200 km et iii) une distance minimale entre les positions initiale et finale de trajectoires est de 600 km.

Afin de décrire le comportement des cyclones extra-tropicaux de manière plus exacte, il faudra saisir et analyser plusieurs caractéristiques pour une assez longue période de temps. Nous proposons d'examiner la densité des trajectoires ainsi que les valeurs caractéristiques de ζ_{gr} et de circulation cyclonique. La densité des trajectoires comprend ici le nombre des trajectoires discrètes traversant au moins de 333 km (~ 3 degrés de latitude) sur n'importe quel point de grille. Ce paramètre permet d'examiner les régions de formation, d'intensification et de dissipation, ainsi que la vitesse de déplacement et la direction principale. Aussi, il est possible de compter les cyclones une fois le long de sa trajectoire et d'identifier ceux qui se déplacent très rapidement. En prenant en compte chaque centre identifié à chaque temps d'archive, les cyclones quasi stationnaires obtiennent une grande importance dans leur nombre.

Lambert (1996) pour sa part traite un cyclone intense par la valeur centrale de P_{NM} qui est plus petite ou égale à 970 hPa. D'après Rosu (2005), par contre, un cyclone est intense si la valeur centrale de ζ_{gr} est plus grande ou égale à $6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Cependant, Sinclair (1997, 2000) dénote que le développement des cyclones n'implique pas nécessairement l'amplification du tourbillon au centre. Il recommande donc de combiner les deux critères pour pouvoir classifier les cyclones selon leur intensité : il faudra que la valeur centrale de ζ_{gr} soit plus grande que $6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, et en même temps, la circulation cyclonique (C_{gr}) soit plus grande que $6 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

La plupart des études réalisées au sujet des cyclones extra-tropicaux mettent en évidence la nécessité de suivre les trajectoires des cyclones. Nous récapitulerons certaines d'entre elles ayant pour sujet l'étude des changements des indices d'activité cyclonique dus au changement climatique par de divers MCG. Par la suite, nous présenterons une approche qui comprend l'analyse des cyclones sans les relier aux trajectoires.

La méthode souvent employée pour identifier les extrêmes locaux pourrait se décrire en termes de comparaison aux points voisins de grille. Dans des algorithmes objectifs, cette comparaison peut s'assembler à certaines méthodes pour tracer les centres (entre autres, König et al., 1993; Sinclair et Watterson, 1999; Wernli et Schwierz, 2005). Or il existe une technique de traitement des patrons. Elle repose sur le principe de l'identification des régions autour des extrêmes dans le champ de tourbillon à 850 hPa (Hodges, 1996) ou dans le champ de P_{NM} (Hodges, 1999).

König et al. (1993) suggèrent de définir le centre des cyclones comme étant la combinaison du minimum de la hauteur du géopotentiel à 1000 hPa et du maximum du tourbillon relatif à 850 hPa. Cela est dû au fait que les extrêmes dans le champ de tourbillon se développent plus rapidement que dans le champ de géopotentiel. La méthode pour suivre les trajectoires se fonde sur l'observation que les cyclones, aux latitudes moyennes et hautes, se déplacent principalement vers l'Est. La méthode consiste à retenir les secteurs communs, à chaque temps d'archive successif, entre les domaines spécifiés en recherche. Le rapport entre le nombre d'occurrences de cyclones au point de grille et le nombre total d'archives représente la fréquence des cyclones. Dans les conditions d'une hausse de concentration équivalente en CO_2 , le modèle atmosphérique utilisé (ECHAM2) montre une légère diminution de la fréquence des cyclones. De plus, les trajectoires principales aux latitudes moyennes se décalent vers le pôle.

Schubert et al. (1998) utilisent la stratégie de Blender et al. (1997) selon laquelle les centres de cyclones se définissent par un minimum de la hauteur du géopotentiel à 1000 hPa. Cela inclut aussi l'analyse en grappe (« cluster analysis », en anglais) aux 3 premiers jours d'existence des cyclones. Cette technique consiste à décomposer un ensemble des trajectoires en fonction de la direction de leur déplacement. Les trajectoires des cyclones, dans l'hémisphère Nord, se regroupent de manière à distinguer les cyclones qui se déplacent vers l'Est, vers le Nord-Est et ceux

stationnaires. Dans les conditions d'un doublement de CO_2 représentées par le modèle atmosphérique ECHAM3, le nombre des cyclones, qui se déplacent vers le Nord-Est, augmente au détriment des cyclones stationnaires.

Lambert (1998, 1995) examinait les cyclones sans tenir compte de leurs trajectoires. En analysant le nombre des centres par $200\,000\text{ km}^2$, pour 5 hivers (décembre à février), il a conclu que le MCG2 montre un défaut en reproduisant les cyclones dans les régions montagneuses. Les conditions d'un $2\times\text{CO}_2$ pourraient amener à une réduction du nombre total des cyclones et à une hausse du nombre des cyclones intenses, sans changement notable de leurs positions géographiques. Plus tard, Lambert (2004) confirme ces conclusions, précédemment atténuées en considérant les minimums dans le champ de P_{NM} .

La phase 1 du Projet de comparaison de MCG (AMIP 1) comprenait une comparaison parmi de 13 modèles couplés du climat : la plupart d'entre eux surestiment la fréquence des cyclones présentés par le minimum de P_{NM} (Lambert, 2002). Par ailleurs, certains des travaux récents se concentrent sur l'étude effectuée à l'aide de diverses MCG. Lambert (2002) met en évidence que la majorité des MCG dénotent un surplus des cyclones principalement dans les régions de haute orographie.

Dans le cadre du projet IPCC AR4 (Fourth Assessment Report), Lambert et Fyfe (2006) ne détectent aucun changement notable des positions géographiques des cyclones, pendant que Yin (2005) indique un décalage vers le pôle. Cependant, les deux études s'accordent pour dire qu'il y a une intensification des cyclones dans le climat projeté.

Lors de la phase 2 du projet de comparaison des MCG (AMIP2), Bengtsson et al. (2006) notent que les changements particuliers se produisent au niveau régional en ce qui concerne la position des trajectoires.

La structure de ce mémoire est la suivante. La méthodologie employée dans notre étude s'appuie en partie sur celle qui a été élaborée par Rosu (2005). Le premier chapitre met l'accent sur la méthodologie utilisée : a) le principe du fonctionnement de l'algorithme de Sinclair, b) la brève introduction de deux modèles MCG et des ré-analyses ERA-40, et c) la mise au point de la méthode statistique. Le deuxième chapitre porte sur l'évaluation des résultats provenant des simulations fournies par la plus récente période climatique, MCCG3. Cette évaluation comprend la validation par les ré-analyses ERA-40 et une mise en parallèle avec MCCG2. Le dernier chapitre étudie les répercussions projetées de l'augmentation des GES sur la climatologie et la variabilité interannuelle des cyclones d'hiver en Amérique Nord.

CHAPITRE I

ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie utilisée pour réaliser des objectifs de cette étude. La première section donne la courte description de la performance de l'algorithme de Sinclair. Il s'agit en fait d'une version améliorée au cours de son application à l'UQÀM. Par la suite, nous exposons des propriétés générales de deux dernières générations de MCG canadien et des ré-analyses ERA-40. Finalement, la dernière section se consacre sur l'approche statistique en incluant des mesures établies afin de décrire certains caractéristiques des cyclones extra-tropicaux.

1.1 Cyclones dans l'algorithme de Sinclair

L'algorithme de Sinclair sert à calculer, de façon automatisée, un ensemble de paramètres qui décrit les trajectoires des cyclones extra-tropicaux dans le champ de ζ_{gr} . Ce code informatique permet en fait de détecter les cyclones aux 6 heures et ensuite de les organiser selon leurs trajectoires. Le champ de ζ_{gr} à 1000 hPa se calcule à partir du champ de la hauteur du géopotentiel (H) à 1000 hPa (voir appendice A).

Les informations nécessaires sur chacune des trajectoires incluent l'heure et la date d'enregistrement et aussi le nombre de fois qu'un centre a été constaté le long de sa trajectoire. Dans notre cas, chaque centre identifié se caractérise aussi par sa

position géographique (latitude, longitude) et sa valeur centrale de ζ_{gr} . D'ailleurs, les informations additionnelles incluent la pression au niveau moyen de la mer (P_{NM}), la circulation cyclonique (C_{gr}) et la vapeur d'eau précipitable (EP).

Le centre cyclonique près de la surface est marqué à chaque point de grille où la valeur de ζ_{gr} à 1000 hPa est la plus grande comparativement à ses 8 points de grille voisins. Ce critère n'est pas fiable parce que le champ de ζ_{gr} est influencé par les erreurs d'interpolation associées aux régions de haute orographie. Donc, il fallait établir un seuil inférieur de ζ_{gr} en fonction de la hauteur de topographie. Quand cette hauteur est plus petite que 1000 m, le seuil est égal à 2,5 CVU. Dans le cas opposé, ce seuil serait en fonction de l'altitude et d'un coefficient de filtrage. De plus, une interpolation par la fonction bicubique (« bicubic spline », en anglais) s'applique afin de trouver, parmi les points de grille adjacents, la position plus précise d'un vrai maximum de ζ_{gr} .

Tous les centres des cyclones, identifiés aux 6 heures (Δt) pour une période choisie, suivent une procédure d'intégration dans les trajectoires.

1.1.1 Trajectoires des cyclones dans le champ de ζ_{gr}

Le schéma, pour suivre le déplacement des centres cycloniques, est basé sur celui de Murray et Simmonds (1991a). La conception principale comprend à estimer s'il existe une concordance entre un centre qui est identifié au temps d'archive donné et celui du prochain temps d'archive ($t + \Delta t$). La probabilité d'une telle association se calcule de façon à ce qu'il y ait la minimisation des sommes des écarts absolus entre les centres appropriés. Mais, avant d'introduire cette fonction, il faudra expliquer certaines notions.

De quelle façon, les centres, qui sont identifiés aux deux temps d'archive consécutifs, pourraient être synchronisés ? Selon la technique de Sinclair (1997), le

lien se définit à travers des valeurs extrapolées (au $t + \Delta t$) de position $\vec{r}(t)$, de $\zeta_{gr}(t)$ et de $P_{NM}(t)$ à l'aide des équations suivantes :

$$\vec{r}_{est}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + w_m \cdot \vec{f}l + (1 - w_m) \cdot \frac{1}{2} \vec{V}_{500hPa} \cdot \Delta t \quad (1.1.1)$$

$$\zeta_{gr_{est}}(t + \Delta t) = \zeta_{gr}(t) + w_v \cdot [\zeta_{gr}(t) - \zeta_{gr}(t - \Delta t)] \quad (1.1.2)$$

$$P_{NM_{est}}(t + \Delta t) = P_{NM}(t) + w_p \cdot [P_{NM}(t) - P_{NM}(t - \Delta t)] \quad (1.1.3)$$

où w_m , w_v et w_p sont des poids spécifiés afin d'extrapoler la position $\vec{r}(t)$, ζ_{gr} et P_{NM} , respectivement; \vec{V}_{500hPa} est le vecteur du vent à 500 hPa. La forme d'un vecteur du déplacement $\vec{f}l$ dépend du nombre d'identifications d'un cyclone le long de sa trajectoire, n :

$$\vec{f}l = \begin{cases} \frac{\vec{r}(t) - \vec{r}(t - 4\Delta t)}{4}, n > 4 \\ \frac{\vec{r}(t) - \vec{r}(t^*)}{n - 1}, n \leq 4 \end{cases} \quad (1.1.4)$$

où $\vec{r}(t^*)$ est le vecteur de position initiale d'une trajectoire désignée. La suite de trajectoires ne dépend que de la vitesse et de la direction du vent à 500 hPa parce que le poids w_m se fixe à zéro.

Le test de concordance se réalise en utilisant la probabilité de l'association (Pr) entre les centres extrapolés et ceux qui sont identifiés au $t + \Delta t$. Ces derniers représentent les centres candidats à la distance radiale de $rad = 777$ km (voir équation 1.1.5). Donc, chacun des centres extrapolés peut être entouré par ces centres candidats concordants et peut en effet constituer un groupe d'associations.

$$\text{Pr} = 1 - \frac{(\Delta d)^2 + \frac{1}{2} \frac{(\alpha \cdot \Delta \zeta_{gr})^2 + (\beta \cdot \Delta P_{NM})^2}{1 + \frac{\zeta_{gr}(t)}{5}}}{rad^2} \quad (1.1.5)$$

Où Δd est la distance entre un centre extrapolé et son candidat ; $\Delta \zeta_{gr}$ et ΔP_{NM} sont des écarts correspondants de ζ_{gr} et de P_{NM} , respectivement; α et β sont des coefficients de pondération définis de la façon suivante : $\alpha = 1.6 \text{ km}$, $\beta = \frac{0.55}{\text{SIN}[lat(t)]}$

Afin de former un ensemble d'associations les plus probables chaque groupe concède à travers une procédure de permutation. La procédure de maximisation sert à choisir quel centre extrapolé sera la suite d'une trajectoire parmi plusieurs centres associés à un centre commun ayant la même probabilité maximale. Une des combinaisons mutuellement exclusives, dont la somme des probabilités atteint son maximum, aura l'avantage par rapport à celles plus petites. Or quand la probabilité tend vers zéro, il n'y a pas d'association et en effet la fin de trajectoire est mise en évidence.

1.1.2 Circulation cyclonique

Le schéma du calcul de la circulation du vent ne convient qu'aux cyclones qui sont identifiés par le tourbillon. La circulation du vent de gradient est représentée par le flux de ζ_{gr} à travers le secteur de circulation d'air cyclonique (A) :

$$C_{gr} = \iint_A \zeta_{gr}(A) dA \quad (1.1.6)$$

où dA est un élément de surface, infinitésimal, en coordonnées polaires (R, Θ). Ce paramètre tient compte de la taille du système de rotation et du tourbillon. De cette façon, il constitue une mesure de l'intensité de cyclones plus réaliste que le tourbillon ou la pression (Sinclair, 1997).

Le secteur de circulation cyclonique A peut être défini par une région autour du centre où ζ_{gr} diminue vers la périphérie. La frontière de cette région est définie comme l'endroit où le tourbillon arrive à un minimum (alors, le tourbillon ζ_{gr} passe par zéro ou devient négatif).

La méthode du calcul consiste à déterminer une valeur de C_{gr} dans chacun des sous-secteurs. Le secteur de circulation est subdivisé radialement autour du centre (espace radial ΔR est 111,1 km) et en sous-secteurs à chaque 20° d'azimut (incrément azimutal $\Delta\Theta$ est 0.34906 radian). Les valeurs de ζ_{gr} qui caractérisent ces sous-secteurs sont déterminées en appliquant une interpolation Bicubique. La vérification de critères à la frontière commence lorsque la distance radiale du centre cyclonique R devient plus grande que 555,5 km. Il est possible que la frontière obtienne une forme irrégulière ainsi que les secteurs voisins se superposent. Dans ces cas, les limites frontières se déplacent radialement vers le centre, mais pas plus d'un tiers de la distance du centre R par 20° d'azimut. Donc, l'intégrale de C_{gr} représente une somme des C_{gr} partielles :

$$C_{gr} = C_{gr0} + \sum_{\theta} \sum_r \zeta_{gr}^{int} \frac{\pi}{18} [(R + \Delta R)^2 - R^2] \quad (1.1.7)$$

$$C_{gr0} = \zeta_{gr}^{centre} R_0^2 \pi \quad (1.1.8)$$

où C_{gr0} est la circulation autour du centre en unités de $10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (i.e., 1 CU;

« Circulation Unit », en anglais) et $R_0 = \frac{1}{2} \Delta R$ km est le rayon du cercle qui l'entoure.

1.1.3 Vapeur d'eau précipitable

Selon de divers scénarios climatiques, une hausse de température de surface pourrait favoriser l'évaporation et donc les précipitations. La quantité de vapeur d'eau atmosphérique peut être décrite par l'eau précipitable (EP , unités : kg m^{-2} ou mm

d'H₂O). EP peut s'expliquer par la quantité de précipitations qui tomberait par unité de surface si toute la vapeur d'eau atmosphérique dans une colonne était entièrement condensée :

$$EP = \frac{1}{g} \int_{p_b=1000hPa}^{p_t=300hPa} r(p) dp \quad (1.1.9)$$

où $r(p)$ est le profil vertical du rapport de mélange de la vapeur d'eau, pris dans la couche atmosphérique entre 1 000 hPa à 300 hPa. Dans l'algorithme de Sinclair, l'équation (1.1.9) prend la forme suivante :

$$EP = \frac{1}{g} \sum_p \overline{r(p)} \Delta p \quad (1.1.10)$$

où $\overline{r(p)} = \frac{r(p) + r(p + \Delta p)}{2}$ est le rapport de mélange $r(p)$ moyen dans la couche entre deux niveaux consécutifs de pression, p et $p + \Delta p$. Le champ de $r(p)$ est calculé en fonction de la température absolue de l'air $T(p)$ et de l'humidité relative de l'air $U(p)$.

Voici un exemple comment un cyclone peut être associé au champ correspondant d' EP tel que présenté dans la figure 1.1.1. Nous avons suivi le changement de position d'un cyclone au-dessus des Etats-Unis (le centre est marqué par le symbole **H** ayant le tourbillon ζ_{gr} de 6 CVU). La masse d'air, à l'intérieur de la région cyclonique, provenant des régions subtropicales, est riche en vapeur d'eau précipitable. Lorsque le cyclone se déplace en direction nord-ouest, cette masse d'air relativement chaude et humide devient moins exprimée.

1.2 Données d'entrée dans l'algorithme de Sinclair

Dans la section précédente, nous avons noté les champs d'entrée :

- i) la hauteur du géopotential à 1000 hPa (H),
- ii) la hauteur de l'orographie (H_0),
- iii) les deux composantes (\vec{u}, \vec{v}) du vent à 500 hPa, et
- iv) le rapport de mélange r aux niveaux standard de pression (300, 400, 500, 600, 700, 850, 925 à 1000 hPa).

Les variables, notées ci-dessus, ont été transformées de manière à satisfaire les propriétés de la grille polaire stéréographique centrée sur le pôle Nord. Le domaine hémisphérique est couvert par les 97 x 97 points selon l'axe x et l'axe y respectivement, avec un maillage de 180 km à 60 degrés de latitude. La grille ainsi spécifiée est considérée comme suffisante pour ce type d'usage. Étant les champs d'entrée influencés par des oscillations non physiques, les biais étaient éliminés en appliquant un filtre. L'analyse de Cressman (voir Rosu, 2005) consiste à filtrer les données en les pondérant spatialement dans une interpolation linéaire : schématiquement, l'influence d'une observation sera d'autant plus forte dans un domaine d'influence centré autour du capteur.

Pour les besoins de cette étude, les champs d'entrée sont fournis par les ré-analyses ERA-40, les simulations de MCG2 du climat récent, ou les simulations et les projections du MCG3 dans le futur. Les ré-analyses ERA-40 sont archivées aux 6 heures, sur une grille uniforme en longitude et latitude, les mailles étant de 2,5 degrés (145 x 73 cellules). Les champs simulés, définis spectralement sur une grille gaussienne, ont été interpolés (la technique Bicubique) sur la grille longitude latitude et ensuite ont été interpolés sur les niveaux de pression.

Le vent est dérivé des champs simulés de tourbillon et de divergence. Dans le cas de MCG3, le champ de géopotiel n'était pas fourni, il est alors calculé en fonction des variables simulées, l'humidité spécifique $q(p)$, P_{NM} , $T(p)$ et H_0 :

$$H = \frac{1}{g} \int_p^{P_{NM}} R \frac{T}{p} dp + H_0 \quad (1.2.1)$$

où $R = R_d \cdot [1 + 0.608 \cdot q(p)]$ est la "constante" spécifique respectivement de l'air humide et $R_d = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ est la constante de l'air sec.

1.2.1 Modèle couplé de circulation générale (MCCG)

En général, la paramétrisation de nombreux processus physiques dans la dernière version du MCCG est qualitativement semblable à celle du MCCG2. Cependant, il y a des différences importantes en ce qui concerne leur structure. Les modèles couplés représentent l'effet radiatif net de tous les GES au moyen d'une concentration équivalente de CO_2 (source : www.cccma.bc.ec.gc.ca). Cette concentration est nécessairement plus élevée que celle qui est observée, et par conséquent, symbolise le forçage climatique dû au CO_2 et les autres GES.

1.2.1.1 Deuxième génération de MCCG (MCCG2)

Des composantes principales de MCCG2 comprennent le modèle de circulation atmosphérique MCGA2, le modèle de circulation océanique MOM1.1 assemblé au modèle mer-glace Flato/Hibler et le schéma de surface terrestre « bucket ». MCGA2 opère à la résolution horizontale qui comprend un développement en harmoniques sphériques avec troncature triangulaire au nombre d'onde 32 (T32). C'est d'environ 3,7 degrés de latitude et de longitude. À la verticale, ce modèle couvre 30 km d'atmosphère en 10 niveaux hybrides, avec le toit à 10 hPa.

Le changement du forçage par GES est représenté comme une perturbation relative à la concentration équivalente en CO₂ de 330 ppmv utilisée dans les simulations du climat de référence.

1.2.1.2 Troisième génération de MCCG (MCCG3)

Le MCCG3 est une version avancée de MCCG2. Les nombreuses améliorations apportées incluent la troisième version du modèle de circulation atmosphérique MCGA3, un nouveau modèle océanique (NCAR, NCOM 1.3), le modèle mer-glace Flato/Hibler et un système bien perfectionné de surface terrestre nommé CLASS (Versegny et al., 1992). MCGA3 opère à une résolution horizontale T47 (approximativement 2,5 degrés de latitude et de longitude). Le domaine vertical est plus profond (environ 50 km) et possède les 32 niveaux hybrides, avec le toit à 1 hPa. Les simulations du changement climatique impliquent des changements relatifs à 348 ppmv de CO₂, ce qui est légèrement plus élevé en comparaison à MCCG2. Selon le scénario SRES A2 du GIEC, les émissions de CO₂ continuent à croître de façon exponentielle. En général, ce scénario envisage une croissance de la population à 15 milliards par l'année 2100.

1.3 Traitement statistique

La méthode statistique employée dans cette étude suit celle de Rosu (2005). D'ailleurs, nous avons tenté de développer cette méthode afin de mieux comprendre et décrire le comportement moyen des cyclones extra-tropicaux.

La grille du calcul est définie sur le domaine de 20 à 90 degrés de latitude Nord, avec une distance de 277 km entre des points les plus proches. Ainsi, il y a 29 et 145 points dans la direction zonale et méridienne, respectivement. Le secteur d'intérêt est défini comme étant l'aire du cercle du rayon de 333 km centré à chaque point de grille.

Seulement la distribution spatiale des cyclones au-delà d'une échelle fixée donne une consistance à la comparaison objective de différents modèles (Sinclair, 1997). L'étape finale a compris alors le filtrage des statistiques où nous avons appliqué, pour la dernière fois, la technique de Cressman.

1.3.1 Élimination de certains systèmes cycloniques

L'algorithme de Sinclair génère les faibles systèmes cycloniques stationnaires d'origine orographique et thermique (les moussons en Asie, la dépression de l'ouest de Californie). Afin d'éliminer leurs trajectoires du traitement statistique, nous avons utilisé les trois critères :

- 1) la longévité minimale est de 24 heures (le centre est identifié au moins 4 fois),
- 2) la longueur minimale des trajectoires est de 1200 km et
- 3) la distance minimale entre les positions initiale et finale est de 600 km.

La condition d'une longueur minimale n'élimine tout à fait pas les cyclones quasi-stationnaires. Dans les régions situées entre 20 et 35 degrés de latitude Nord, les cyclones qui, parcourant plus de 1200 km pourtant, persistent plus de 15 jours dans une zone localisée. Il s'agit en fait des cyclones subtropicaux. Donc, afin de se concentrer seulement sur les systèmes migratoires, nous avons introduit la troisième condition.

1.3.2 Densité des trajectoires des cyclones

Un des indices de l'activité cyclonique, la densité des trajectoires est définie ici par le nombre des trajectoires discrètes traversant le secteur d'intérêt (d'environ 350 000 km²). L'idée du départ consiste à prendre en considération les trajectoires dont les centres à l'intérieur du secteur ne sont pas enregistrés entre les deux temps d'archive. Comment déterminer de telles trajectoires ? Il faut d'abord déterminer le secteur supplémentaire autour du point de grille, en forme de cercle du rayon de 777

km (~ 7 degrés de latitude). Chaque trajectoire à l'intérieur de ce grand secteur est une tangente potentielle sur le petit secteur. Si la plus courte distance entre chacune de ces tangentes et le point de grille est plus petite que 333 km (~ 3 degrés de latitude), la trajectoire sera prise en compte.

Le principe du calcul de densité « saisonnière » (D_τ) peut être expliqué de la façon suivante. Par exemple, les trajectoires des cyclones ont été suivies aux 6 heures pendant la saison d'hiver 1960/61 (du premier novembre 1960 jusqu'au 30 avril 1961). Comme la saison contient 181 jours, il y a donc 724 intervalles d'archive, pour chaque secteur d'intérêt.

En premier lieu, il faut calculer la moyenne climatique de D_τ sur une période de N ans (30 ans ou plus) :

$$\overline{D_\tau} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{i=N} D_\tau^n \quad (1.3.1)$$

Par la suite, la variabilité interannuelle mesure la dispersion autour de la climatologie $\overline{D_\tau}$:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} (D_\tau^n - \overline{D_\tau})^2} \quad (1.3.2)$$

Selon la définition de l'écart-type (σ , voir www.statcan.ca), environ 95 % des saisons (ou des mois) se caractérisent par des valeurs de D_τ situées à l'intérieur de l'intervalle suivant :

$$\overline{D_\tau} - 2 \cdot \sigma < D_\tau < \overline{D_\tau} + 2 \cdot \sigma \quad (1.3.3)$$

1.3.3 Paramètres caractéristiques

Soit D_c le nombre d'apparitions des cyclones identifiés dans un secteur d'intérêt pour une période choisi. La saison d'hiver par exemple contient 724 intervalles d'archive, tandis que la saison d'été a en 736, un mois de 30 jours a en 120). Des paramètres comme les valeurs caractéristiques de ζ_{gr} , de C_{gr} et d'EP décrivent des phases du développement des cyclones au-dessus d'un secteur d'intérêt :

$$\overline{\zeta_{gr}} = \frac{1}{D_c} \sum_{i=1}^{D_c} \zeta_{gr}^i \quad (1.3.4)$$

$$\overline{C_{gr}} = \frac{1}{D_c} \sum_{i=1}^{D_c} C_{gr}^i \quad (1.3.5)$$

$$\overline{EP} = \frac{1}{D_c} \sum_{i=1}^{D_c} EP^i \quad (1.3.6)$$

La position des centres cycloniques, spécifiée à toutes les 6 heures, permet à estimer la vitesse de déplacement :

$$V_{cyc} = \frac{1}{(N-1)\Delta t} \sum_{i=1}^N d_i \quad (1.3.7)$$

où N est le nombre des positions identifiées, sur une trajectoire située à l'intérieur du secteur supplémentaire (celui du rayon de 777 km); d_i est la distance entre les deux positions aux temps d'archivage successifs. Donc, une valeur représentative de la vitesse de déplacement des cyclones (D_τ est le nombre des trajectoires) est représentée par la relation suivante :

$$\overline{V_{cyc}} = \frac{1}{D_\tau} \sum_{i=1}^{D_\tau} V_{cyc}^i \quad (1.3.8)$$

Résumé du chapitre

Le premier chapitre a présenté la méthodologie pour atteindre des objectifs établis. La première section a été concentrée sur une caractérisation des cyclones extra-tropicaux à l'aide l'algorithme de Sinclair. Au début, la méthode, pour tracer les cyclones extratropicaux, a été brièvement expliquée. Par la suite, les méthodes de calcul de la circulation cyclonique et de l'eau précipitable ont été présentées. D'autre part, dans la deuxième section, nous avons mis en évidence les caractéristiques des données nécessaires pour suivre les cyclones. La dernière section a décrit la méthode du traitement des ensembles de trajectoires. Aussi, nous avons introduit des paramètres pour décrire le comportement des cyclones dans une période climatique.

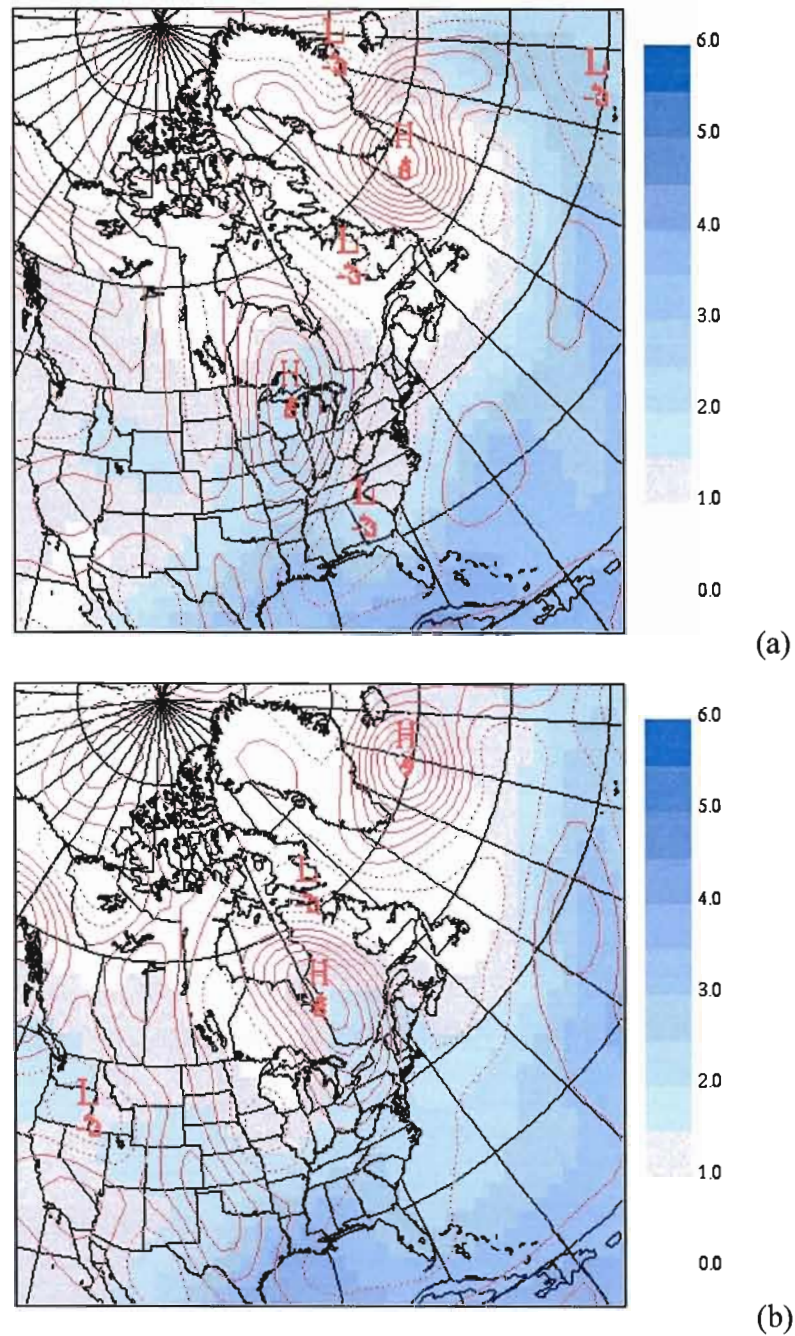


Figure 1.11 : Champ d' EP (en couleur) et le champ de ζ_{gr} à 1000 hPa (en ligne rouge) : (a) 12UTC Novembre 05 1989, (b) 18 heures plus tard. Les contours sont tracés à tous les $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour ζ_{gr} , avec des valeurs positives en trait plein, et à chaque 0,5 cm pour EP .

CHAPITRE II

VALIDATION DU MODÈLE MCGG3

Dans ce chapitre, nous présentons un aspect d'évaluation de MCGG3 à travers certaines statistiques des cyclones extra-tropicaux dans l'hémisphère Nord. La validation des résultats obtenus à partir des simulations de MCGG3 se fonde sur la comparaison avec les ré-analyses ERA-40. Également, afin de noter s'il y a des améliorations par rapport de MCGG2, nous exposons des résultats obtenus à partir des simulations fournies par cette génération antérieure.

Ce projet est fondé sur l'hypothèse selon laquelle MCGG3 est un outil adéquat pour simuler les cyclones extra-tropicaux. La première tâche consiste donc à examiner l'habileté de ce modèle à correctement reproduire les conditions récentes du climat. Nous analyserons d'abord les cyclones extra-tropicaux migratoires (voir article 1.1.3), tout d'abord pour la saison hivernale (novembre à avril), ensuite pour la saison estivale (mai à octobre). Les statistiques (voir section 1.3) sont calculées sur les 30 saisons hivernales (estivales) durant la période climatique de 1961 à 1990.

Les figures marquées par des lettres **a**, **b** et **c** exposent des statistiques effectuées à partir des ré-analyses ERA-40, des simulations de MCGG2 et des simulations de MCGG3, respectivement. Par contre, les figures marquées par des lettres **d**, **e** et **f** indiquent les différences entre MCGG2 et ERA-40, MCGG3 et ERA-40 ainsi que MCGG2 et MCGG3, respectivement.

2.1 Densité des trajectoires des cyclones

La distribution géographique de la densité des trajectoires apporte des informations suivantes : i) régions où les cyclones sont plus fréquents ; ii) directions principales du déplacement ; iii) régions de genèse, d'intensification et d'extinction des cyclones. La climatologie (moyenne sur 30 ans) de la densité permet de représenter la fréquence saisonnière des cyclones. D'autre part, l'écart-type de la densité désigne la variabilité interannuelle de cette fréquence.

2.1.1 Climatologie saisonnière

Les figures 2.1.1 et 2.2.1 se rapportent à la moyenne climatologique de la densité des trajectoires des cyclones extra-tropicaux, pour la saison hivernale et estivale, respectivement. D'après ce que nous avons noté ci-dessus, les figures 2.1.1a et 2.2.1a désignent une situation relativement proche de celle du climat réel. En général, les contours sont en forme zonale et très serrés dans le Pacifique et l'Atlantique.

Saison hivernale

La plupart des cyclones se forment à l'ouest du Pacifique (autour du Japon) et ils se déplacent principalement en direction zonale, vers l'Est. La densité atteint son niveau maximal (21 trajectoires traversent le secteur du rayon de 333 km par hiver) dans les deux régions bien distinctes ; la première est située au sud des îles Aléoutiennes, tandis que la seconde est située sur le golfe d'Alaska. Il semble cependant que ces deux maximums sont dus à des phénomènes différents. L'existence, quasiment permanente, de la dépression des Aléoutiennes contribue au premier maximum. La chaîne des Rocheuses est immense et s'étend le long de la côte occidentale de l'Amérique du Nord. Par conséquent, elle empêche les cyclones d'avancer vers l'Est. Dans ce cas cependant, le vent fort en aval des montagnes cause

leur renforcement (connue en tant que « lee cyclogenesis », en anglais), tandis que presque la moitié de cyclones pénètrent à l'intérieur du continent. La densité des trajectoires prend donc son maximum continental dans les régions des Grands Lacs (18 trajectoires par secteur du rayon de 333 km par hiver). Il faut noter que dans la période froide de l'année, le bassin des Grand Lacs représente la source importante de chaleur et d'humidité qui en favorise le processus de cyclogénèse. Par contre, la présence du courant océanique chaud du Gulf Stream entretient le développement cyclonique au sud-est du continent nord-américain. La direction typique de ces cyclones suit alors celle du courant océanique. Cela signifie que les cyclones se déplacent vers le Nord ou vers le Nord-Est, parallèlement à la côte. La densité des trajectoires la plus prononcée se trouve dans la partie occidentale de l'Atlantique (au sud-est du golfe du Saint-Laurent : plus de 21 trajectoires par secteur du rayon de 333 km). Ce maximum se prolonge jusqu'en Islande où se trouve une dépression permanente. En traversant l'Atlantique, la moitié des cyclones touchent le continent européen, alors que ceux qui passent près de la côte est du Groenland se déplacent vers l'océan Arctique. La région de la mer Méditerranéenne montre un maximum moins prononcé de la densité, environ 9 trajectoires par secteur d'intérêt. Les cyclones, qui se créent dans le golfe de Gênes, se déplacent jusqu'au bord est du bassin de la mer Méditerranéenne. Ou bien, ils pénètrent à l'intérieur du continent européen. Or en Asie, les cyclones sont plus fréquents seulement dans les régions nordiques.

La distribution géographique des cyclones simulés par MCCG2 (voir figure 2.1.1b) presque coïncide avec celle précédemment décrite. Pourtant, en comparaison avec la figure 2.1.1a, les endroits où il existe une surestimation sont encore bien remarquables. Des régions océaniques se caractérisent par les contours qui sont plus rapprochés l'un à l'autre. Par conséquent, des maximums principaux de la densité des trajectoires sont plus prononcés. La figure 2.1.1d expose que MCCG2 génère 10 trajectoires de trop dans le Pacifique (autour du 40°N), en Alaska et à l'ouest de la

Grande-Bretagne. Cela produit une différence relative de 50 %, par rapport aux ré-analyses ERA-40. Par contre, les deux maximums secondaires sont absents (les Grands Lacs et le golfe de Gênes). Étant donné que MCCG2 mettait en évidence la difficulté à reproduire les cyclones dans les régions montagneuses, notre résultat concorde avec la conclusion de Lambert (1995).

La figure 2.1.1c se rapporte à MCCG3 et notifie une distribution des cyclones ressemble à celle des ré-analyses NCEP. Cependant, le maximum, situé au nord du Pacifique, est encore trop fortement exprimé, tandis que ceux des Grands Lacs et du golfe de Gênes sont correctement simulés. Il y a un surplus de 1 trajectoire par secteur d'intérêt, surtout à des latitudes moyennes et élevées (voir figure 2.1.1e). De plus, l'erreur relative est réduite, de 50 à 25 %, par rapport aux ré-analyses ERA-40 ce qui est une amélioration, là où MCCG2 n'est pas assez efficace. En général, MCCG3 reproduit mieux les cyclones que la génération antérieure (voir figure 2.1.1f).

Saison estivale

La figure 2.2.1a montre que les cyclones sont moins fréquents durant la saison d'été. En conséquence, le maximum de la densité des trajectoires se ne manifeste que dans les régions des îles Aléoutiennes et au sud du Groenland (15 trajectoires traversent le secteur du rayon de 333 km). Aux latitudes subtropicales, il y a des erreurs dues à la limitation inférieure de la grille à 20 degrés de latitude Nord.

Le MCCG2 surestime la densité des trajectoires en comparaison aux ré-analyses ERA-40 notamment le long de 40°N, à l'est des Rocheuses, en Afrique et au Moyen Orient (voir figures 2.2.1b et 2.2.1d). Dans le cas de MCCG3 (voir figure 2.2.1c), les maximums océaniques sont même plus prononcés, avec plus de 18 et de 21 trajectoires, par secteur d'intérêt, respectivement. Également, il produit une erreur

relative de plus de 60 %, dans le golfe du Saint-Laurent ainsi qu'à l'est de la Chine (voir figures 2.2.1e et 2.2.1f).

2.1.2 Variabilité interannuelle

Dans le paragraphe précédent, nous avons analysé la distribution géographique de la moyenne de la densité des trajectoires des cyclones, pour les saisons d'hiver et d'été. Afin de décrire la variabilité interannuelle de la densité, nous présentons la distribution spatiale de l'écart-type pour les deux saisons (voir figure 2.1.2).

Saison hivernale

La figure 2.1.2a montre la variabilité, d'un hiver à l'autre, d'une trajectoire par secteur du rayon de 333 km par rapport à la climatologie. Les régions de plus grande variabilité concordent généralement avec celles des maximums de la fréquence climatologique. La partie centrale du Pacifique (le long de la latitude 40°N), la côte Nord-Est de l'Amérique et le sud-est du Groenland sont les endroits où la densité varie considérablement. L'exemple d'une zone autour de l'Island servira à mieux expliquer cette variabilité. La densité moyenne est égale approximativement à 18 trajectoires, tandis que l'écart-type correspondant est égal à 5. Donc, selon la corrélation 1.3.3, dans 95 % des saisons prises en compte, la densité se rend entre 8 et 28. Ces deux valeurs représentent en fait la densité la plus forte et la plus faible, respectivement.

Dans la figure 2.1.2b, pour MCGG2, nous notons que la plus grande variabilité caractérise une région étendue située aux latitudes moyennes. En général, MCGG2 simule relativement grande variabilité interannuelle, comparativement aux ré-analyses ERA-40 (voir figure 2.1.2d). Puisque la valeur de l'écart-type est

influencée par la structure de l'échantillon des densités, ces différences positives sont probablement associées à la surestimation de la densité.

Par contre, la figure 2.1.2c montre que la distribution de l'écart-type, qui est obtenu à partir des simulations de MCG3, coïncide très bien avec celle des ré-analyses ERA-40. En effet, les différences sont largement réduites, ce qui indique des points améliorés (voir figures 2.1.2d et 2.1.2e).

Saison estivale

La densité des trajectoires varie moins en saison estivale qu'en celle d'hiver. Le maximum est marqué au large de la côte Est du Canada (voir figure 2.2.2a). MCG2 simule une grande variabilité d'un été à l'autre. Le premier maximum est situé au-dessus des Grands Lacs et le second est au sud de l'Islande (voir figure 2.2.2b). Puisque MCG3 exagère la variabilité au nord des océans (voir figure 2.2.2c), les déviations, par rapport aux résultats des ré-analyses ERA-40, deviennent aussi grandes que celles de MCG2 (voir figures 2.2.2d, 2.2.2e et 2.2.2f).

2.2 Vitesse de déplacement (caractéristique)

Saison hivernale

La figure 2.1.3a montre que la vitesse de déplacement des cyclones extra-tropicaux est en moyenne entre 40 et 70 km h⁻¹, presque partout dans le domaine hémisphérique, ce qu'est en accord avec les résultats de Hodges (1996). Les cyclones sont les plus rapides (plus de 60 km h⁻¹) dans les régions orientales du Pacifique et de l'Atlantique. Par contre, ils parcourent le continent avec une vitesse d'environ 50 km h⁻¹, à l'exception de la région polaire (moins de 40 km h⁻¹). Typiquement, la vitesse de déplacement diminue brusquement lorsque les cyclones se rapprochent à la

chaîne de Rocheuses. D'autre part, elle devient plus grande en aval des montagnes où les courants descendants d'air sont assez forts. Nous constatons donc que la vitesse de déplacement des cyclones est étroitement liée à la nature de la topographie du terrain.

La figure 2.1.3b présente une distribution ayant une forme presque régulière de V_{cyc} . Les régions des extrêmes sont plus allongées par rapport à celles des ré-analyses ERA-40. En plus, MCG2 notamment sous-estime la vitesse de cyclones presque partout, sauf sur le plateau du Tibet où la surestimation est considérablement grande (voir figure 2.1.3d).

Dans la figure 2.1.3c, nous pouvons noter une bonne similarité avec la distribution des ré-analyses ERA-40, pourtant que la surestimation en Asie centrale (la région de haute orographie) est encore bien présente (voir figure 2.1.3e).

Saison estivale

La figure 2.2.3a indique que les cyclones durant la saison plus chaude se déplacent en moyenne à une vitesse plus lente (40 et 50 km h⁻¹ approximativement). Cette situation peut être reliée à une diminution de la vitesse du courant jet. MCG2 ne peut reproduire correctement que la distribution aux latitudes moyennes, à l'ouest du méridien de Greenwich (voir figures 2.2.3b et 2.2.3d). Par contre, dans le cas de MCG3, bien que la distribution de la vitesse V_{cyc} ressemble à celle des ré-analyses ERA-40, les cyclones traversent le Pacifique plus rapidement (voir figures 2.2.3c et 2.2.2e).

2.3 Vent de gradient : tourbillon et circulation (caractéristique)

Autant de cyclones, dont les valeurs centrales du tourbillon sont aussi proches mais celles de circulation différente, est examiné dans ce projet. Selon la structure, chaque cyclone, qui se caractérise par une très forte circulation, occupe un immense domaine dans le stade de développement plus avancé. Ainsi, notre conception de cette analyse repose sur le fait que la structure des cyclones fait l'impact sur leur intensité.

Saison hivernale

Les figures 2.1.4 et 2.1.5 présentent la distribution géographique des valeurs caractéristiques de ζ_{gr} et de C_{gr} , respectivement.

La figure 2.1.4a montre que les cyclones dans les parties orientales des océans se caractérisent par le plus fort ζ_{gr} (environ 6 CVU). Aussi, le maximum secondaire situé au sud des Rocheuses est un effet des erreurs dues à la présence de la haute orographie (voir section 1.1). La figure 2.1.5a expose la distribution spatiale de la circulation caractéristique. Les cyclones ont la plus forte circulation sont remarquables près des îles Aléoutiennes (entre 12 et 16 CU) et au sud du Groenland (plus de 12 CU). Comme les cyclones dans ces deux régions se caractérisent en moyenne par des valeurs centrales de ζ_{gr} presque identiques. Mais comme leur circulation diffère légèrement, ceci implique que ceux du Pacifique sont plus étendus et dans un stade de développement plus avancé. Puisque les cyclones au nord-ouest de la mer Méditerranéenne se caractérisent par une forte circulation C_{gr} , ils sont plus développés que ceux du Nord-Ouest du Canada.

Dans le cas du MCGG2, nous constatons un problème sur le plateau du Tibet où les valeurs caractéristiques de ζ_{gr} (voir figures 2.1.4b et 2.1.4d) et de C_{gr} (voir figures 2.1.5b et 2.1.5d) sont deux fois trop grandes par rapport à celles des réanalyses ERA-40. Bien que MCGG3 simule ces deux paramètres de façon plus

réaliste en comparaison à MCCG2 (voir figures 2.1.4c et 2.1.5c), le plateau du Tibet demeure une zone problématique (voir figures 2.1.4e et 2.1.4f, et aussi 2.1.5e et 2.1.5f).

Saison estivale

Les figures 2.2.4 et 2.2.5 présentent les distributions climatologiques de ζ_{gr} et de C_{gr} , pour la saison estivale. En général, l'image de l'activité cyclonique (la structure et l'intensité caractéristiques des cyclones) en général concorde avec celle de la saison hivernale. Cependant, dans le cas de MCCG3, il n'y a pas beaucoup d'améliorations par rapport à ce qui est noté en hiver.

2.4 Vapeur d'eau précipitable caractéristique

Finalement, nous analysons la distribution géographique de la quantité de précipitations qui pourrait tomber par l'unité de surface lors du passage d'un centre cyclonique.

Saison hivernale

La figure 2.1.6a montre que l'eau précipitable associée aux centres de cyclones est distribuée sous forme presque zonale. Aux latitudes basses, les centres des cyclones produiraient plus de 30 mm des précipitations, pendant qu'ils deviennent de plus en plus appauvris en *EP* vers des latitudes plus élevées. En effet, dans les régions polaires et à l'intérieur de l'Asie jusqu'au plateau du Tibet, *EP* est plus petite de 10 mm. Nous pouvons conclure ainsi que la capacité des cyclones à produire les précipitations dépend fortement de la distribution de la température, de la proximité des sources d'humidité, et en partie, de la position des hautes montagnes.

Les figures 2.1.6b et 2.1.6c confirment en fait la distribution d' *EP* décrite ci-dessus. En fait, le MCG2 montre des différences plus grandes, comparativement aux ré-analyses ERA-40, que le MCG3 (voir figures 2.1.6b, 2.1.6e et 2.1.6f). Il faut noter que ces différences ne sont pas très grandes.

Saison estivale

De mai à octobre, l'activité des cyclones extra-tropicaux est plus faible. Néanmoins, la quantité de la vapeur d'eau disponible pour les précipitations augmente, tandis que la distribution devient moins régulière (voir figure 2.2.6).

2.5 Signal des phénomènes climatiques

Tel que nous avons noté dans la section précédente, une forte variabilité interannuelle caractérise la densité des trajectoires en hiver, sur les océans. Ces fluctuations sont probablement dues aux variations de la circulation à grande échelle. Hurrell et van Loon (1997) dénotent une corrélation entre l'activité saisonnière des cyclones dans l'Atlantique Nord-Est et l'oscillation nord atlantique (en anglais, « North Atlantic Oscillation » d'où le sigle NAO). Par contre, Zhang et al. (1997) relie l'occurrence des cyclones dans la partie centrale du Pacifique à l'oscillation australe (en anglais, « Southern Oscillation » d'où le sigle SO). Afin de discerner la différence dans la densité saisonnière, entre les années en phase positive et négative du NAO ainsi que du SO, au cours de la période de 1960 à 1990, nous considérons la densité " typique " des trajectoires d'hiver. Il s'agit en fait de la moyenne de la densité (provenant des ré-analyses ERA-40) sur 10 ans, pour chacune des deux phases opposées.

À l'aide du graphe 2.1.7a, nous avons sélectionné les hivers du NAO positif et celles du NAO négatif, ayant un indice plus grand que 1 et plus petit que -1,

respectivement. Durant la phase positive du NAO, les trajectoires des cyclones du nord-est de l'Amérique sont typiquement plus canalisées vers la mer de Norvège que durant la phase négative (voir figure 2.1.8c). Par conséquent, la phase positive est associée à une augmentation de l'activité cyclonique dans cette zone et dans le voisinage des îles Aléoutiennes (moins intense), de même qu'à une légère diminution au sud. Ces résultats concordent avec ceux de Hurrell et Van Loon (1997) ainsi que ceux de Serreze et al. (1997).

Dans le cas du SO, nous avons classifié, à l'aide du graphe 2.1.7b, les hivers en phase positive ou froide (La Niña) et celles de phase négative ou chaude (El Niño), correspondant à l'indice MEI (le **MEI** « Multivariate ENSO Index » calculé à partir de multiples variables enregistrés dans la zone tropicale de l'océan Pacifique) plus grand que 0,5 et plus petit que -0,5, respectivement. Dans la région située entre 40°N et 60°N la densité est typiquement plus forte durant d'un épisode El Niño qu'un épisode La Niña (voir figure 2.1.8b). Cependant, la situation est inverse dans la partie centrale du Pacifique (autour du 40°N), au sud-est des États-Unis et à l'est du bassin méditerranéen.

Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'habileté de MCG3 à reproduire le comportement des cyclones extra-tropicaux, en comparant les statistiques obtenues à partir des simulations de MCG3 à celles des ré-analyses ERA-40, et à celles de MCG2. La mise en évidence est effectuée à l'aide des statistiques calculées sur 30 ans (1961 à 1990) dans l'hémisphère Nord, au nord de 20°N. Nous avons constaté que MCG3 reproduit mieux les cyclones en hiver que ceux en été. Autrement dit, des statistiques de MCG3 concernant la saison d'hiver sont en meilleure concordance avec les ré-analyses ERA-40, comparativement à celles de MCG2.

Aussi, nous avons mis en évidence la différence, dans la densité des trajectoires des cyclones, entre la phase positive et négative du NAO ainsi que du SO (El Niño et La Niña).

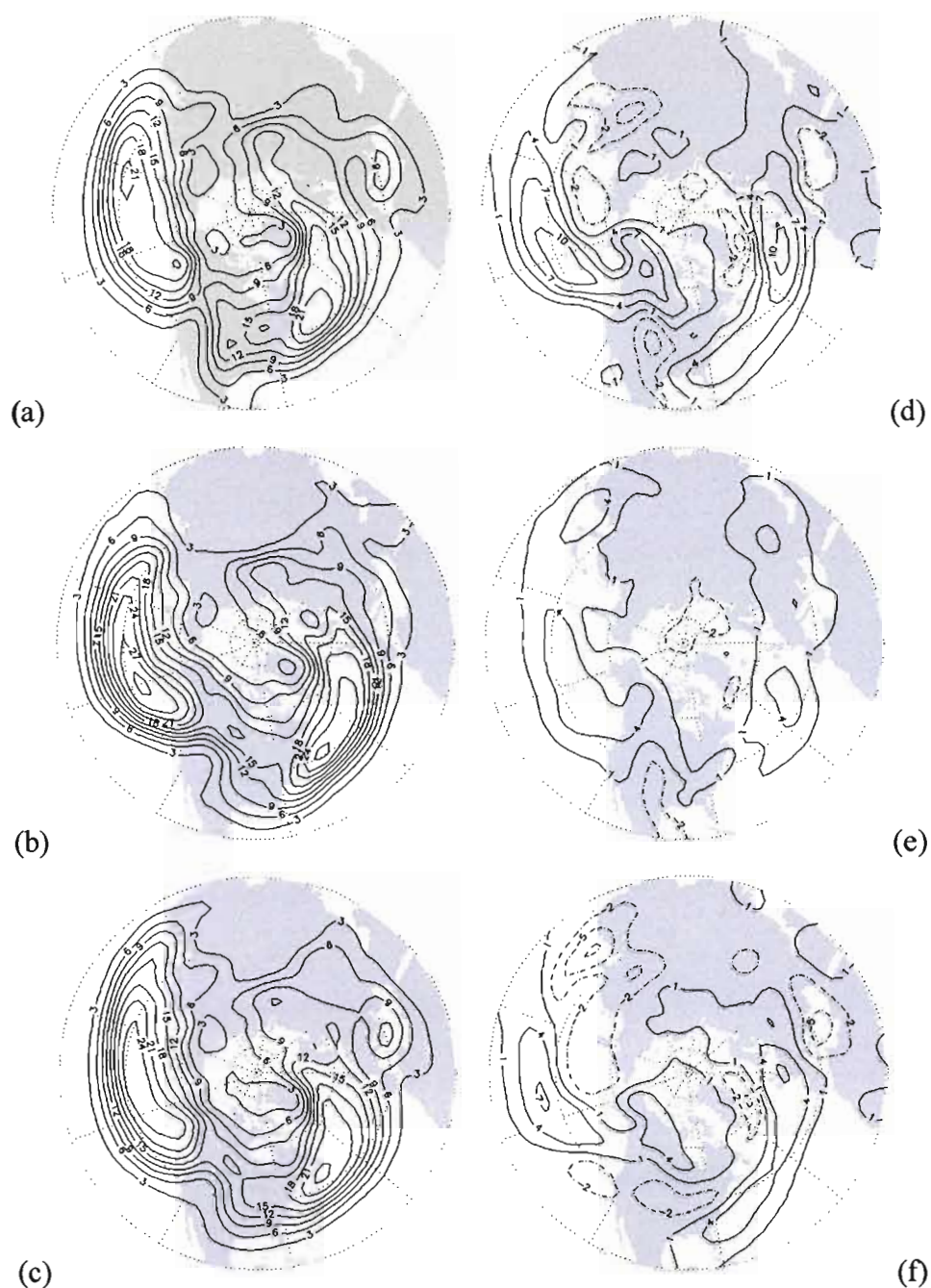


Figure 2.1.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG2, (c) MCG3, (d) MCG2 minus ERA-40, (e) MCG3 minus ERA-40, et (f) MCG2 minus MCG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

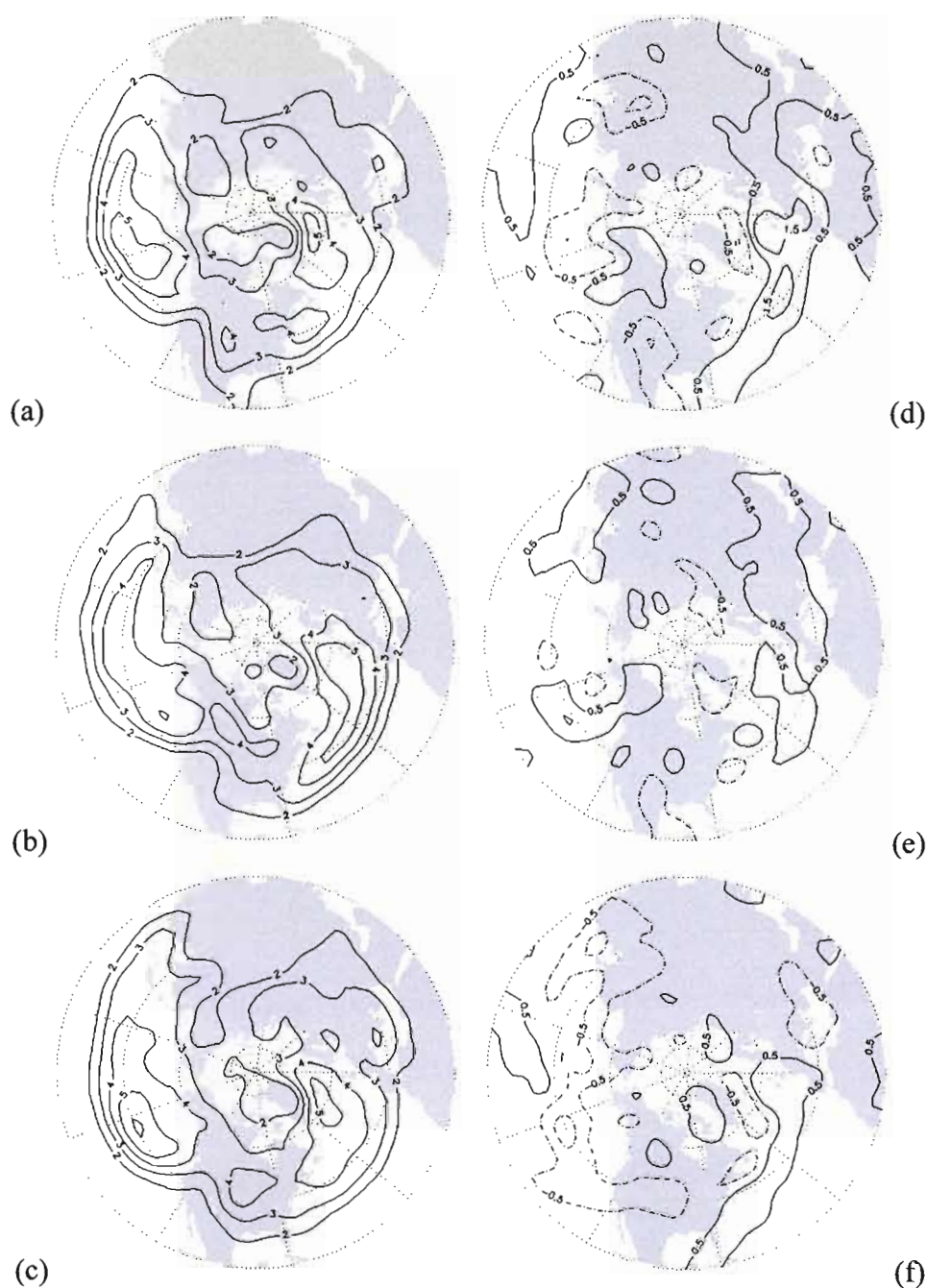


Figure 2.1. 2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

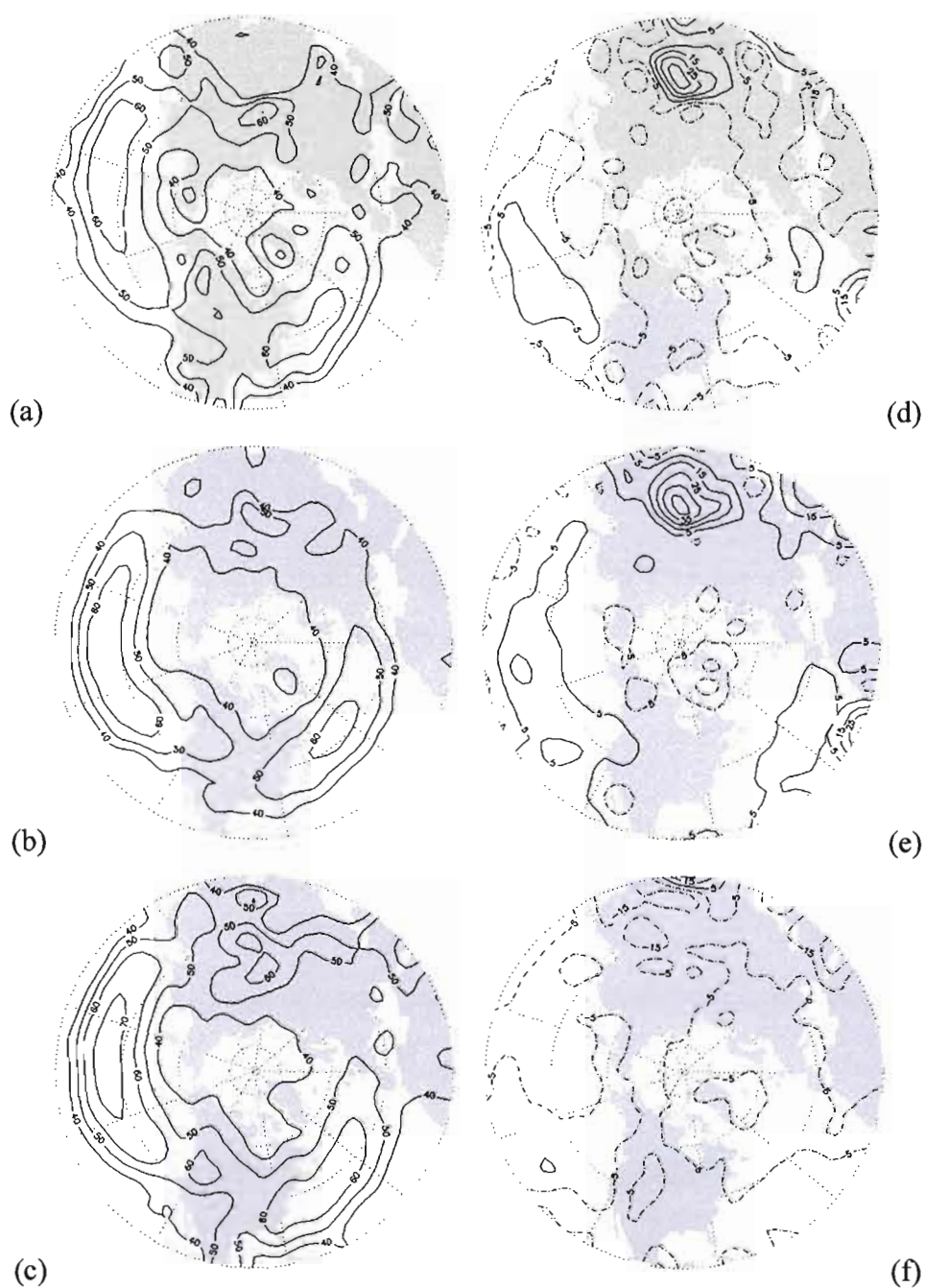


Figure 2.1.3 : V_{cyc} caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

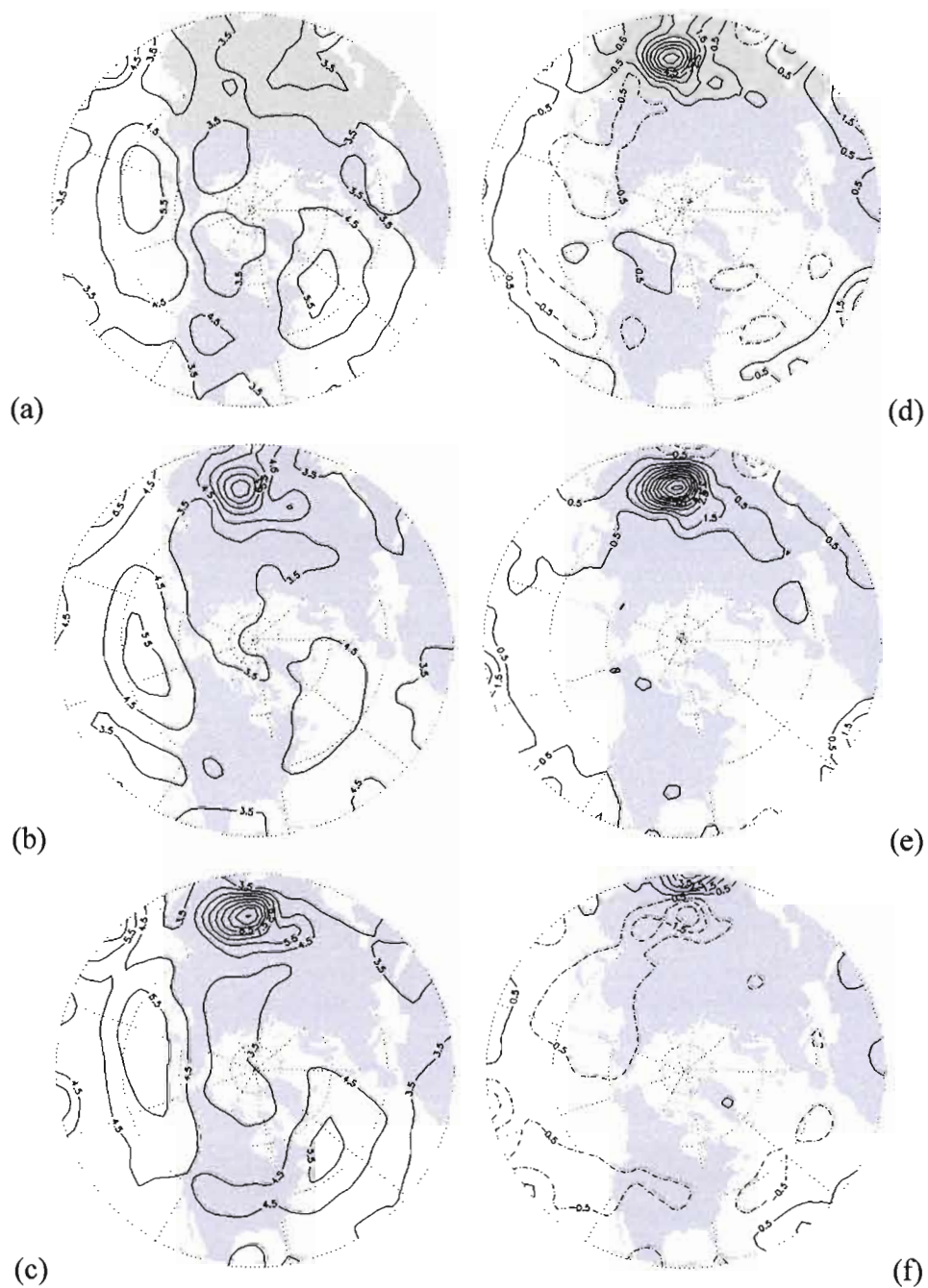


Figure 2.1.4 : ζ_{gr} caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à chaque $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (a), (b) et (c), et à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (d), (e) et (f), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

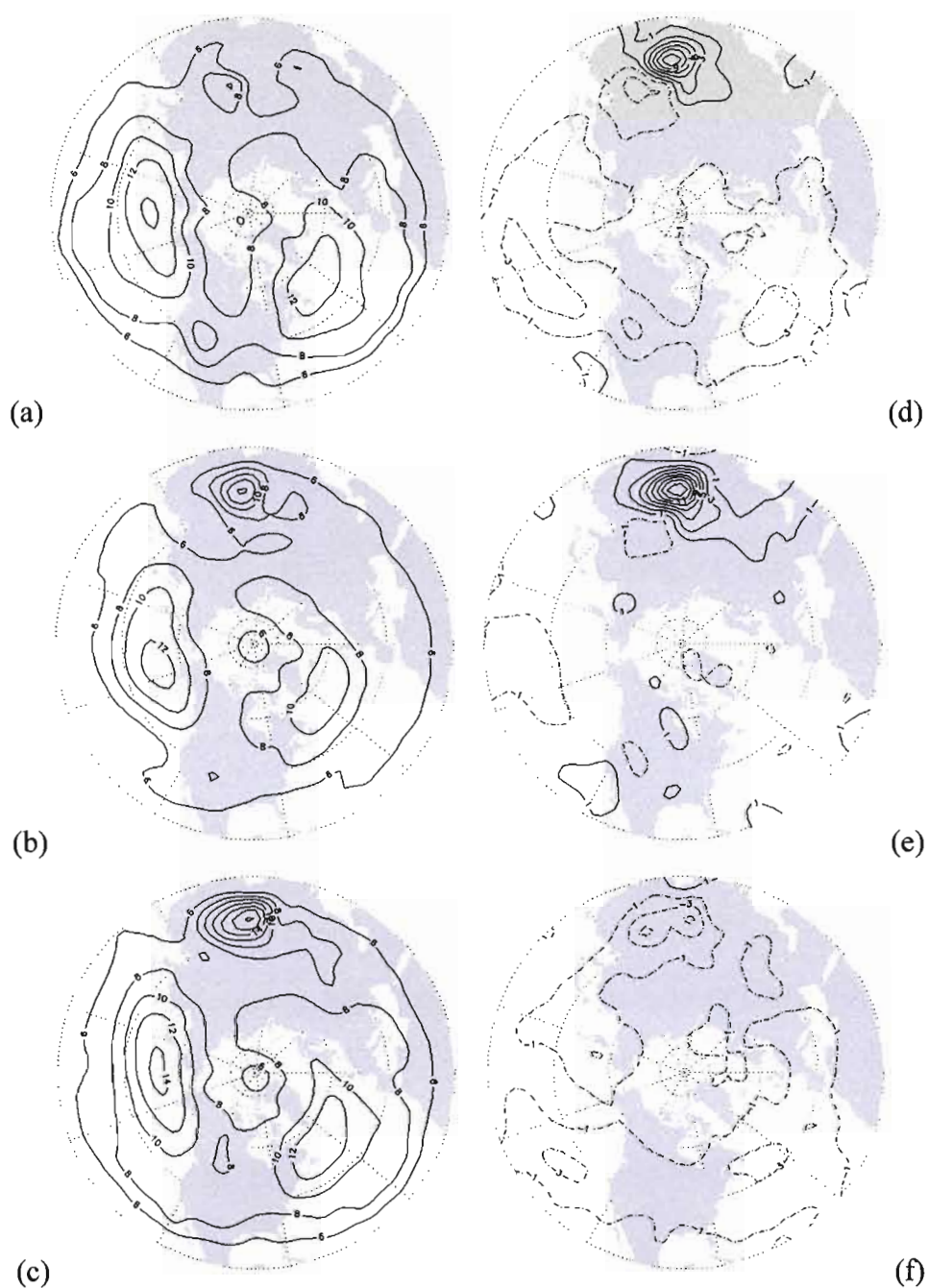


Figure 2.1.5 C_{gr} caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG2, (c) MCG3, (d) MCG2 minus ERA-40, (e) MCG3 minus ERA-40, et (f) MCG2 minus MCG3. Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

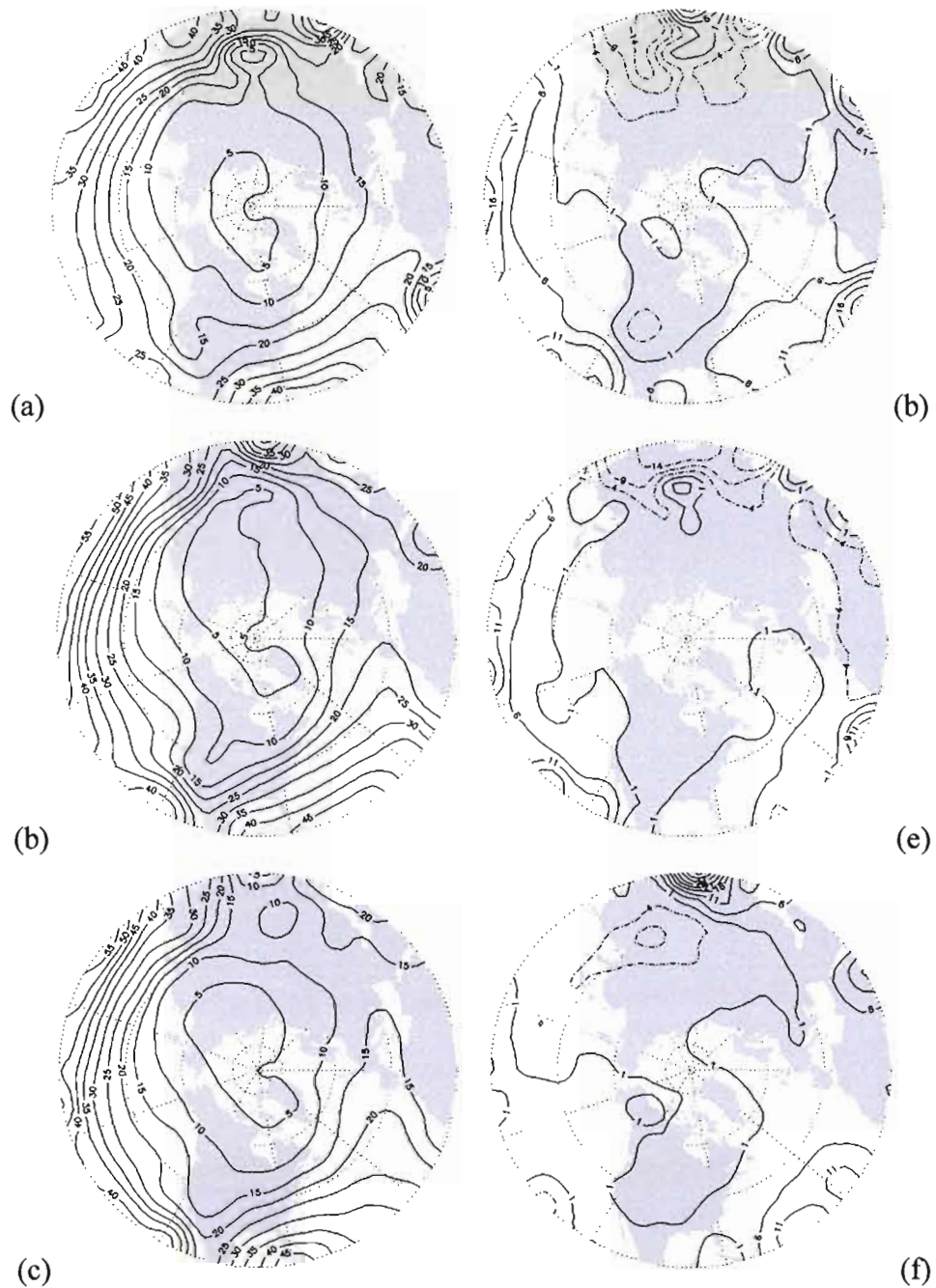


Figure 2.1.6 : *EP* caractéristique pour NDJFMA, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG2, (c) MCG3, (d) MCG2 minus ERA-40, (e) MCG3 minus ERA-40, et (f) MCG2 minus MCG3. Les contours sont tracés à chaque 5 mm, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

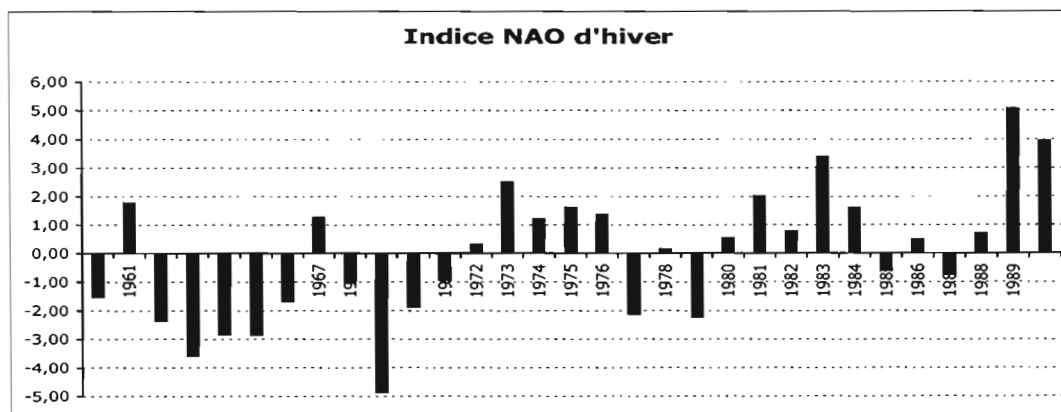


Figure 2.1.7a : Indice d'hiver (décembre à mars) du NAO, de 1960 à 1990. (Le graphe est construit d'après les données extraites du site Internet de l'UCAR : www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell).

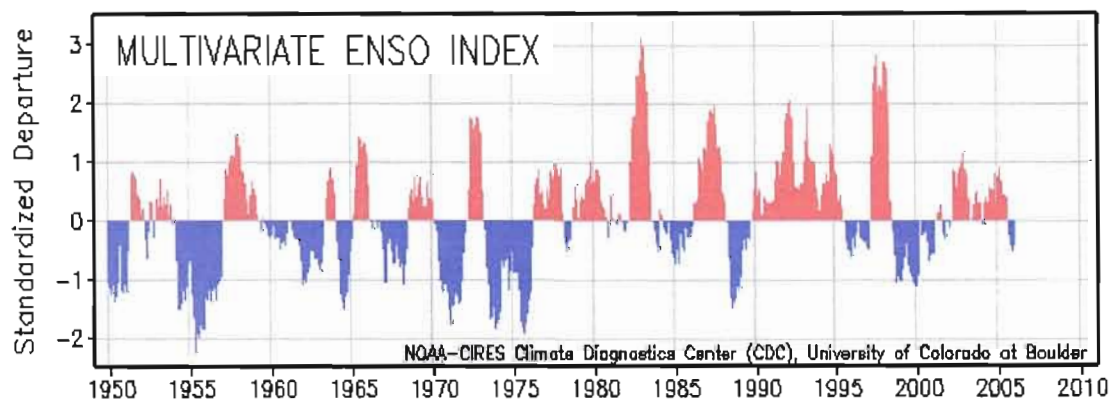


Figure 2.1.7b : Indice multivariable du SO (en rouge pour les MEI positifs et en bleu pour les MEI négatifs). (Le graphe est pris du site Internet du NOAA Climate Diagnostics Center : www.cdc.noaa.gov/ENSO).

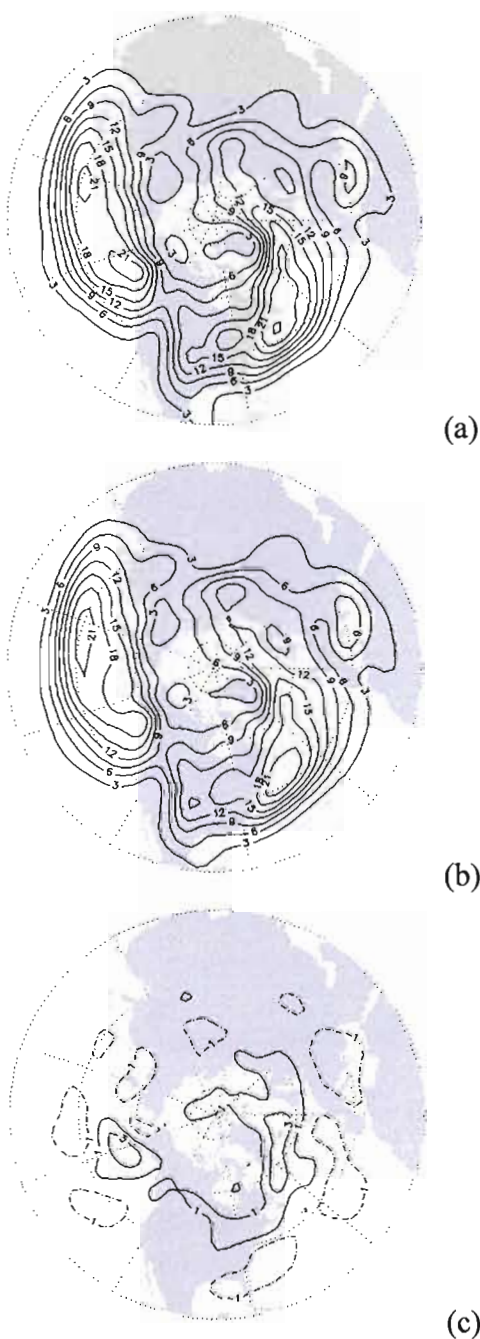


Figure 2.1.8 a : Densité typique des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) en : (a) phase positive du NAO, (b) phase négative du NAO, (c) différence entre (a) et (b). Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires pour (a) et (b), et de 2 trajectoires pour (c) par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

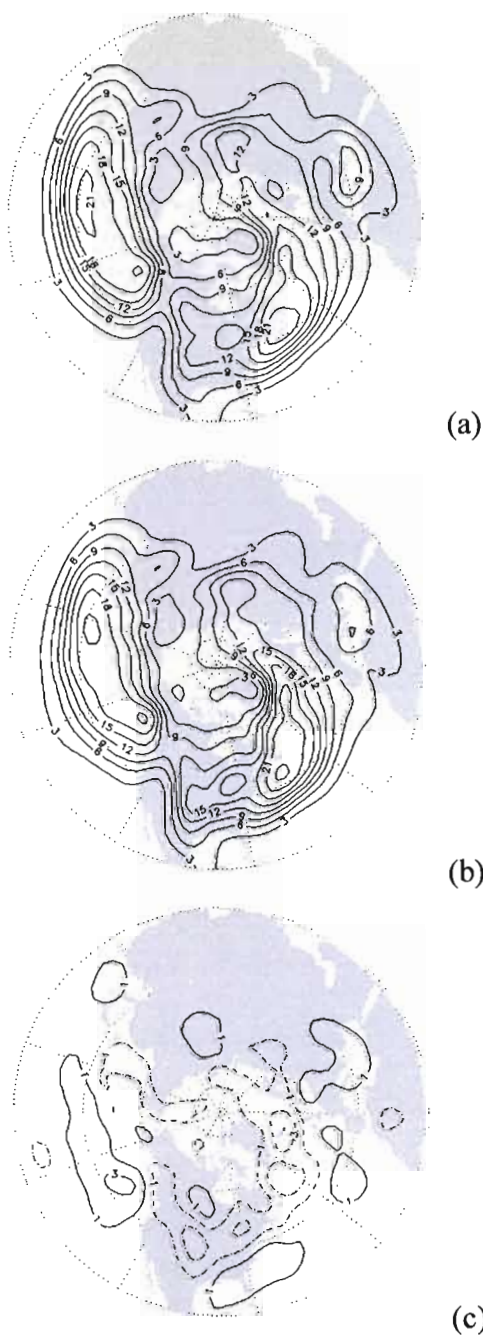


Figure 2.1.8 b : Densité typique des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) en : (a) phase positive du SO (La Niña), (b) phase négative du SO (El Niño), (c) différence entre (a) et (b). Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires pour (a) et (b), et de 2 trajectoires pour (c) par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

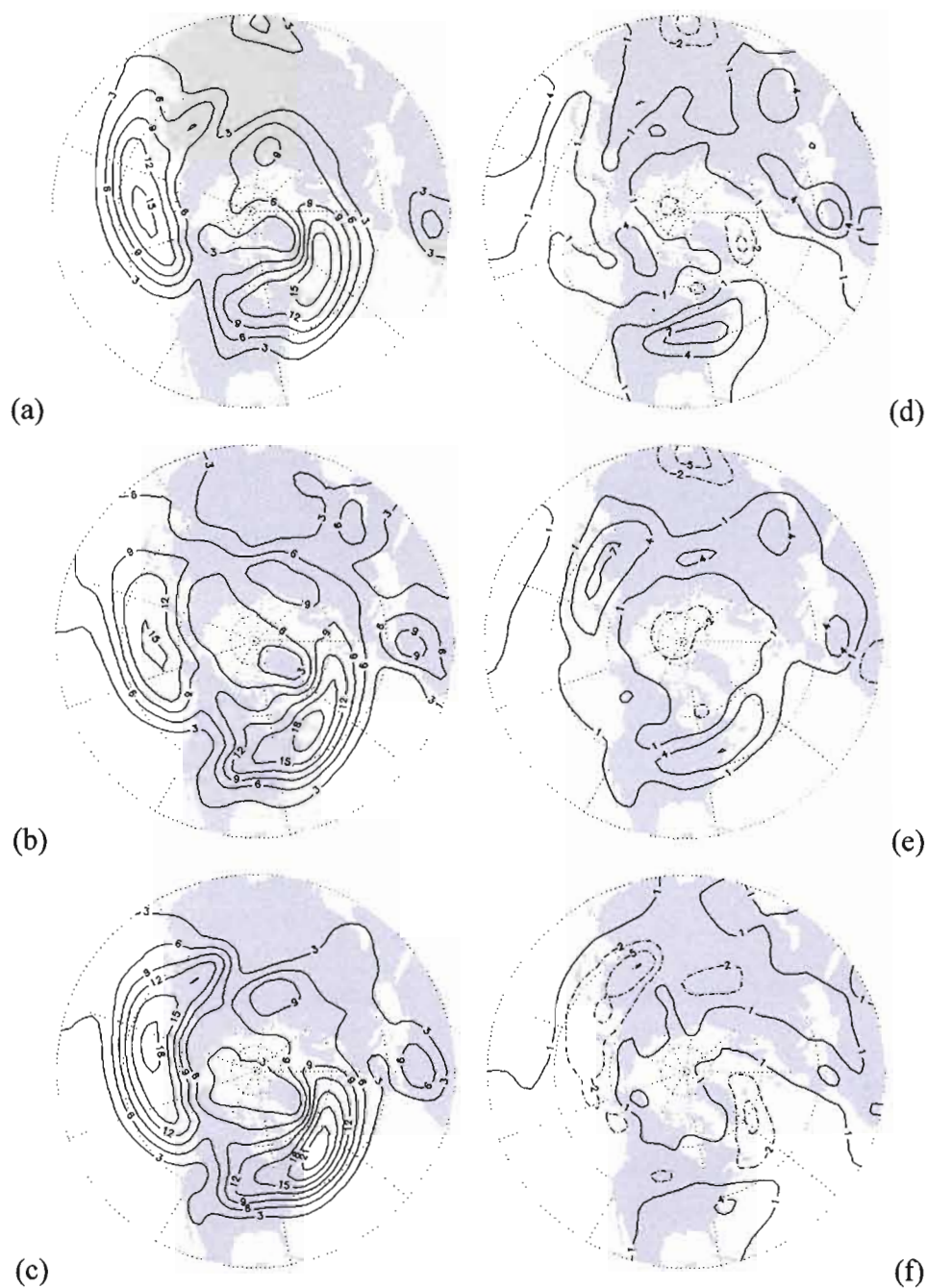


Figure 2.2. 1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones estivaux (MJJASO), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

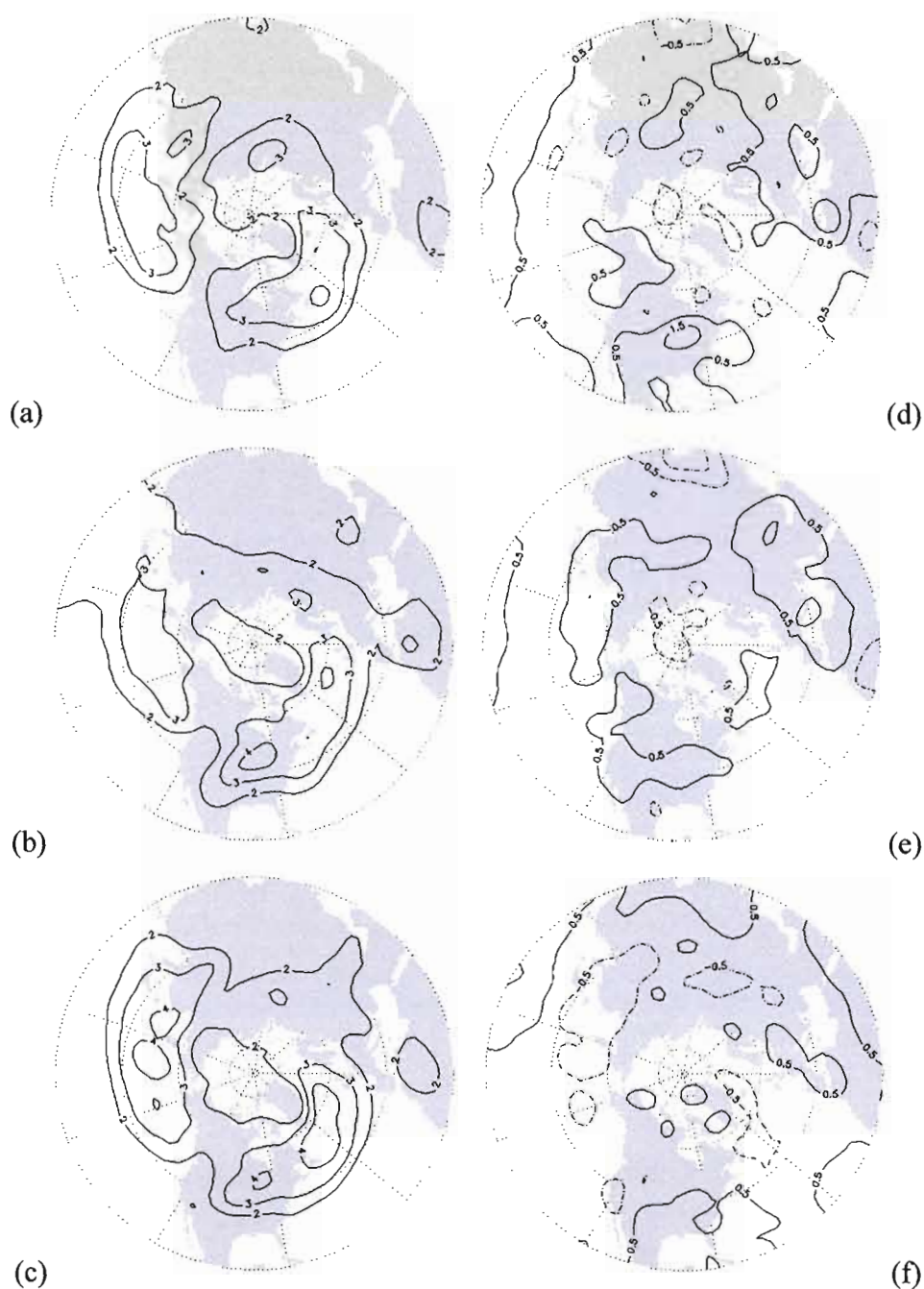


Figure 2.2.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones estivaux (MJJASO), 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

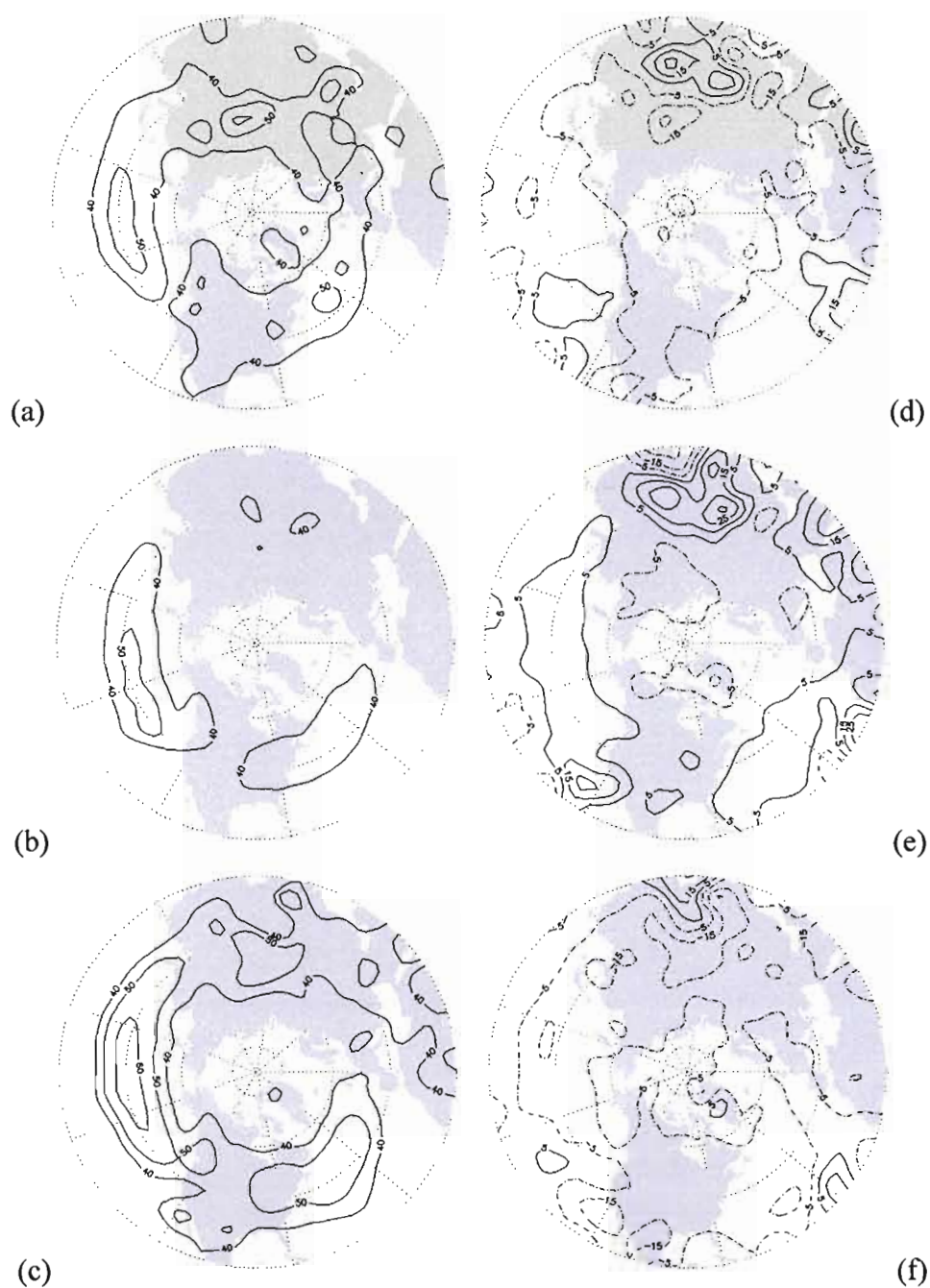


Figure 2.2.3 : V_{cyc} caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à tous les 10 km h⁻¹ à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

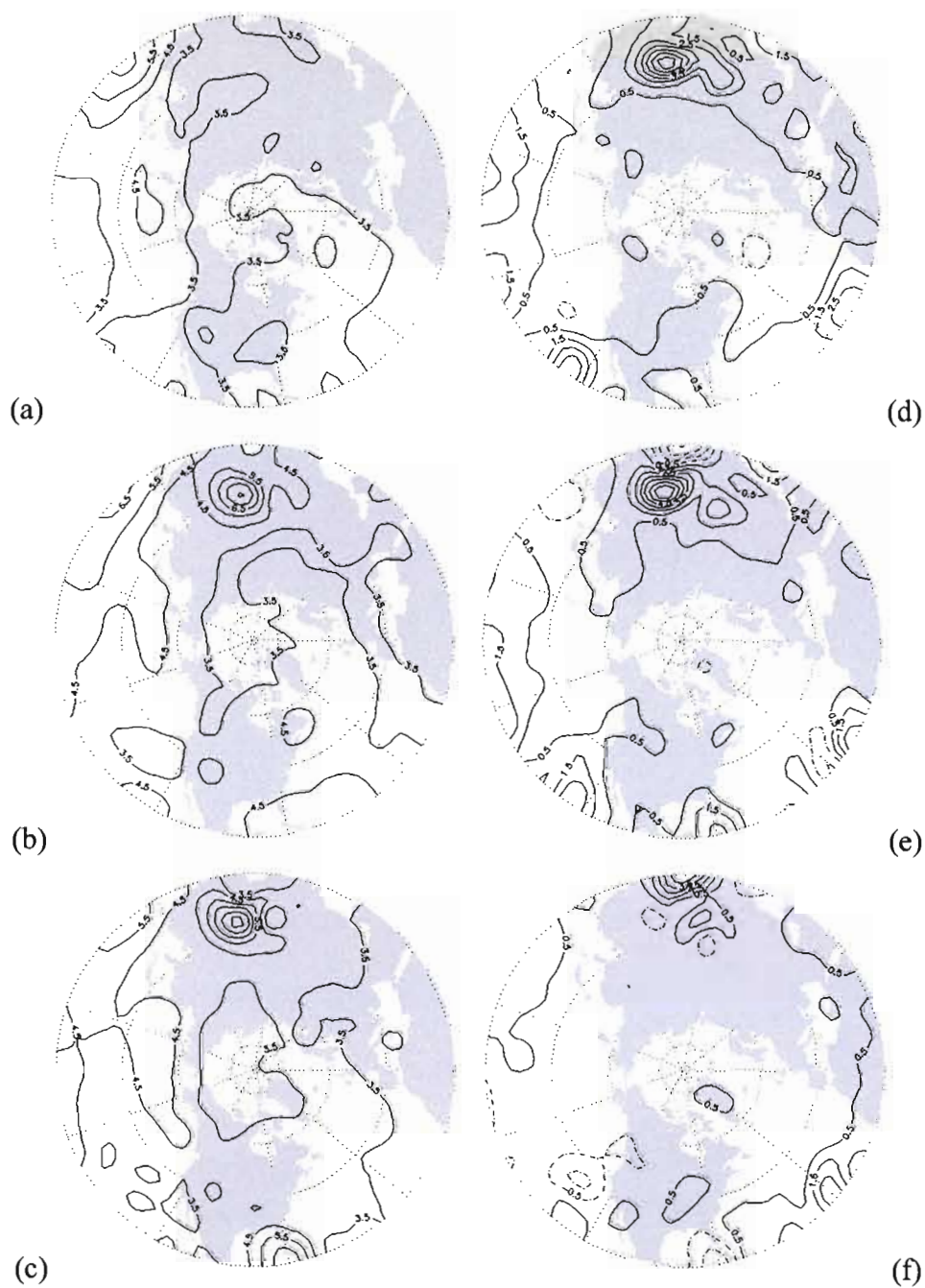


Figure 2.2.4 : ζ_{gr} caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à chaque $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (a), (b) et (c), et à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (d), (e) et (f), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

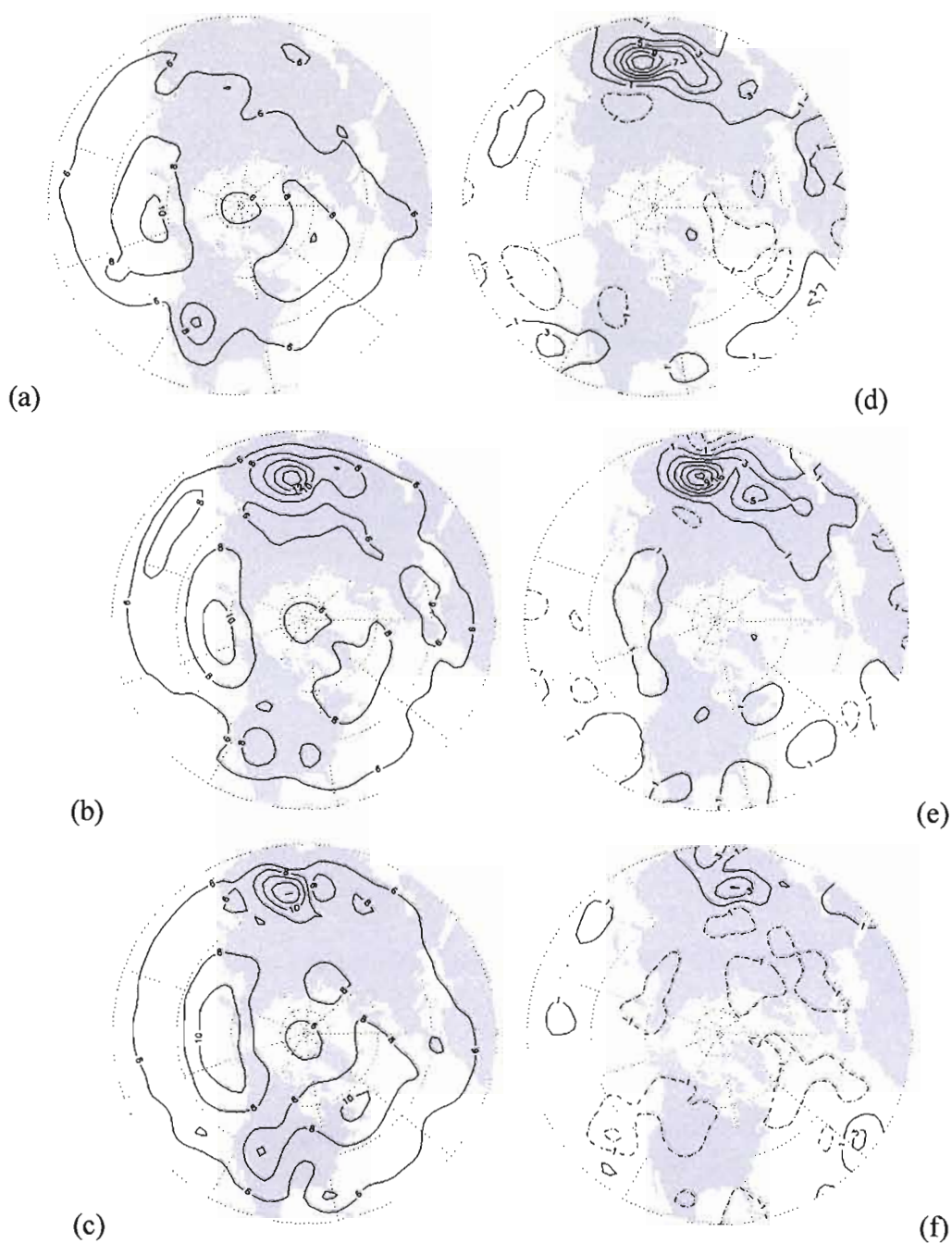


Figure 2.2.5: C_{gr} caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG2, (c) MCGG3, (d) MCGG2 minus ERA-40, (e) MCGG3 minus ERA-40, et (f) MCGG2 minus MCGG3. Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

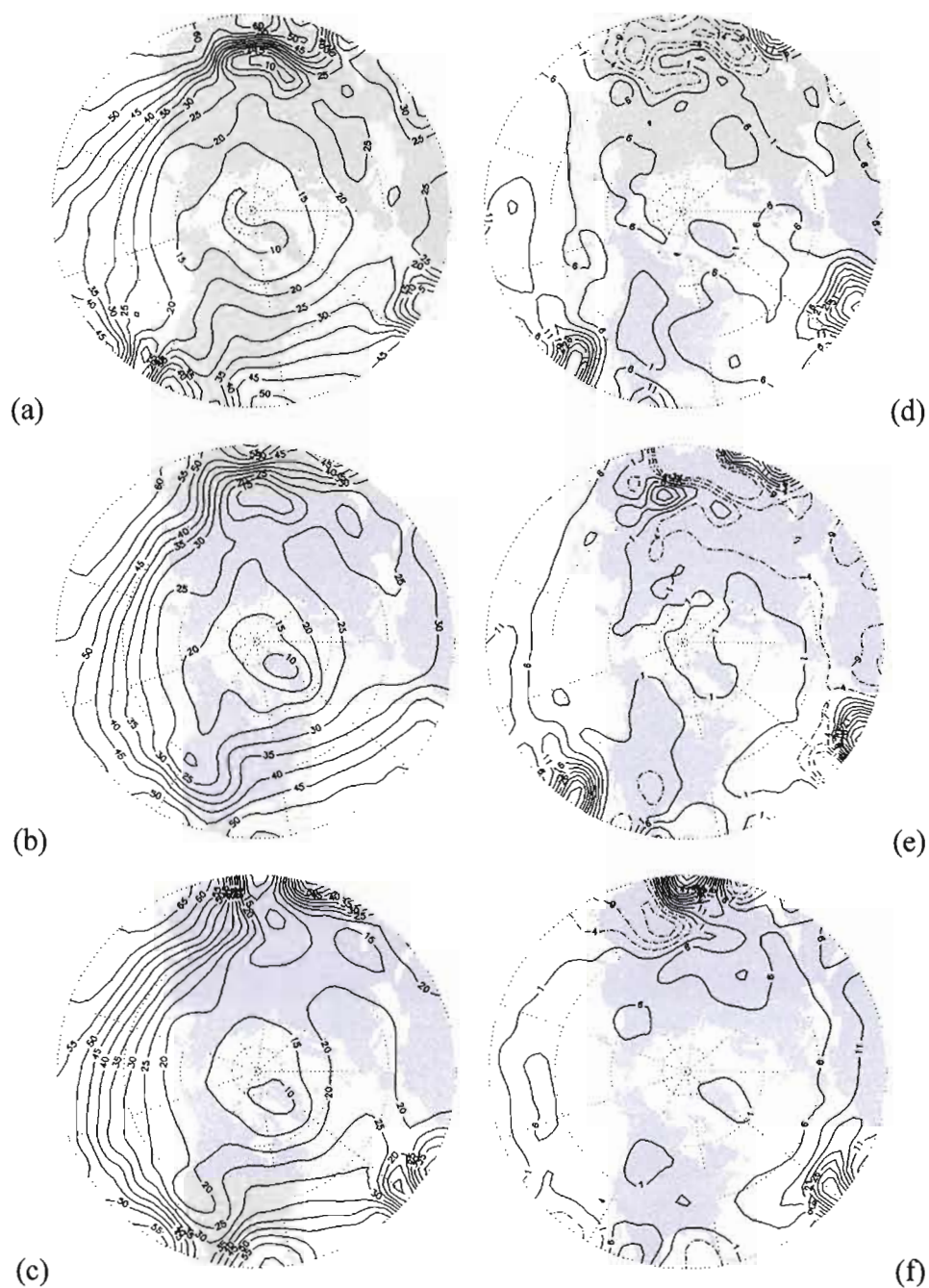


Figure 2.2.6 : *EP* caractéristique pour MJJASO, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG2, (c) MCG3, (d) MCG2 minus ERA-40, (e) MCG3 minus ERA-40, et (f) MCG2 minus MCG3. Les contours sont tracés à chaque 5 mm, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

CHAPITRE III

ÉVOLUTION DES CYCLONES DANS LE FUTUR

Dans le chapitre précédent, nous avons vérifié que MCCG3 représente un suffisamment bon outil pour étudier les cyclones extra-tropicaux particulièrement pour la saison d'hiver. Nous consacrons ainsi ce chapitre à l'étude de l'évolution anticipée des cyclones d'hiver, en partant des projections fournies par ce modèle climatique. Ce chapitre se compose de deux sections. La première section comporte la comparaison au niveau statistique entre les cyclones hivernaux (novembre à décembre) dans le climat récent et ceux du climat projeté. La deuxième section reprend la comparaison mais pour les cyclones durant les mois de novembre et d'avril. Cette analyse se concentre sur une région restreinte, l'Amérique du Nord, située entre 20 et 90 degrés de latitude Nord et entre 52°5' et 127°5' de longitude Ouest.

Les figures démarquées par des lettres **a** et **b**, exposent des statistiques effectuées à partir des simulations (1961 à 1990 : climat de référence) et des projections (2041 à 2070, scénario SRES A2 du GIEC : climat projeté) de MCCG3, respectivement. Le changement du climat entre ces périodes est présenté par la lettre **c**.

3.1 Cyclones d'hiver (NDJFMA)

Nous avons déjà mis en évidence, de façon plus au moins détaillée, la distribution des cyclones d'hiver sur un domaine limité (voir chapitre II). Cependant, il faut répéter brièvement des caractéristiques récentes des cyclones au-dessus de l'Amérique du Nord et ensuite de les comparer à celles qui sont projetées.

3.1.1 Densité des trajectoires : moyenne climatologique et variabilité interannuelle

Tel que nous avons noté dans la section 2.1, les cyclones extratropicaux, qui touchent le continent nord-américain, proviennent surtout du Pacifique Nord et des Grands Lacs (voir figure 3.1.1a). La distribution spatiale de leur fréquence est largement influencée par l'orographie particulière du terrain, les hautes montagnes côtières à l'Ouest et les Grandes Plaines dans la partie médiane. D'une part, les montagnes Rocheuses, situées tout au long de la côte pacifique, empêchent les cyclones du Pacifique de pénétrer à l'intérieur du continent. La chaîne des Appalaches et le Gulf Stream d'autre part contribuent au déplacement des cyclones le long de la côte Est de l'Amérique. La plus grande densité des trajectoires durant l'hiver (plus de 24 trajectoires par secteur du rayon de 333 km) est dans une vaste région du Golfe d'Alaska, ainsi qu'à l'est du golfe du Saint-Laurent. Or la plupart des cyclones proviennent de la direction des Grands Lacs et de la zone orientale du continent. Ils se déplacent principalement vers le Nord-Est à travers la péninsule de Labrador. Nous remarquons que les contours deviennent plus serrés à l'est du Groenland c'est-à-dire que les cyclones changent leur direction près de cette barrière orographique de plus de 3000 m d'altitude.

Dans les conditions climatiques appréhendées où la concentration en CO₂ atmosphérique aura doublé, il n'y a pas de grands changements dans la climatologie

des cyclones décrite ci-dessus (voir figure 3.1.1b). Les différences présentées dans la figure 3.1.1c indiquent en fait que la densité des trajectoires, aux latitudes supérieures de 40°N, augmente légèrement pendant qu'elle diminue aux latitudes plus basses.

La figure 3.1.2a montre que la variation interannuelle de la densité des trajectoires est plus forte dans le Pacifique, des Grands Lacs et finalement dans l'Atlantique. Par exemple, la densité des trajectoires varie entre 12 et 36 et entre 10 et 20, respectivement, dans le Pacifique et les Grands Lacs (voir article 1.3.3). Par contre, dans l'Atlantique Nord-Est, cette variabilité est moins prononcée, le nombre des trajectoires va entre 18 et 25 par secteur.

Dans le cas du climat projeté, MCCG3 n'indique que, d'un hiver à l'autre, une diminution négligeable de la variabilité des cyclones (voir figure 3.1.2b et 3.1.2c).

3.1.2 Vitesse de déplacement (caractéristique)

Les cyclones extra-tropicaux en général traversent l'Amérique du Nord à la vitesse moyenne supérieure à 40 km h⁻¹ (voir figure 3.1.3a). Les cyclones traversent plus rapidement une région en s'étendant à partir du golfe du Mexique vers l'Atlantique Nord-Est. La plus petite vitesse de déplacement (moins de 40 km h⁻¹) est simulée au nord du Canada (la Baie d'Hudson et les îles dans l'océan Arctique). Cette distribution reste sans changement, dans le climat projeté, à des latitudes plus grandes que 30°N (voir figure 3.1.3b). Les différences sont notables seulement au sud du domaine (voir figure 3.1.3c).

3.1.4 Tourbillon et circulation cyclonique (caractéristiques)

La figure 3.1.4a montre que la plupart des cyclones se caractérisent par le tourbillon ζ_{gr} qui va entre 4 et 5 CVU, tandis que la figure 3.1.5a expose la circulation C_{gr} qui va entre 8 et 10 CU. La zone de plus fort tourbillon (plus de 4,5 CVU) s'étend à partir des Grandes Plaines vers le Nord-Est afin d'atteindre son maximum à l'Est de

la péninsule du Labrador (environ 6 CVU). La plus forte circulation (plus de 12 CU) correspond en fait à la région du tourbillon prononcé. Ainsi, les cyclones dans l'Atlantique sont plus développés que ceux des prairies (en aval des Rocheuses). En fait, en provenant du Pacifique, les cyclones commencent s'intensifier près des Rocheuses.

Dans les conditions futures du climat, le maximum du tourbillon est faiblement atténué au-dessus de la mer du Labrador (voir figures 3.1.4b et 3.1.4c). La circulation n'induit que peu de changements locaux (voir figures 3.1.5b et 3.1.5c).

3.1.5 Analyse d'un échantillon isolé des cyclones d'hiver

Cette section consiste à étudier le comportement des cyclones dans un endroit particulier. L'analyse inclut les valeurs centrales du tourbillon ζ_{gr} , de la pression P_{NM} et de la circulation cyclonique C_{gr} . Le golfe du Saint-Laurent représente une des régions où les cyclones sont très fréquents. Le secteur d'intérêt y est alors centré à un point ayant comme coordonnées $45^{\circ}N$ et $305^{\circ}O$. Le nombre total de centres cycloniques (N) est défini comme étant le nombre de tous les centres identifiées, à toutes les 6 heures, au cours des 30 hivers.

Dans le cas du climat récent, nous comparons des résultats de MCGG3 avec ceux des ré-analyses ERA-40. La distribution de MCGG3 est surestimée en termes de ζ_{gr} ainsi que de C_{gr} (voir figures 3.1.6a et 3.1.6b). D'ailleurs, il existe un manque de tels cyclones dans quels P_{NM} est très basse ou très haute (voir figure 3.1.6c). Est-ce que ces écarts sont statistiquement significatifs ? Pour répondre à cette question, nous avons procédé au test statistique du Khi-carré de Pearson (χ^2) : l'hypothèse nulle (H_0) postule qu'il n'y a pas de différence entre les deux distributions ; l'hypothèse alternative (H_1), quant à elle, postule que ces différences existent ; le seuil de signification est fixé à 0,1 (i.e. le risque de commettre une erreur en déclarant que H_1

est 10 %). À la lecture du tableau 3.1.1, nous constatons que la valeur de χ^2 , concernant chacune des distributions (ζ_{gr} , P_{NM} , et C_{gr}), dépasse la valeur critique χ^2_{crit} . Donc, il faut rejeter l'hypothèse H_0 et conclure que les différences entre les distributions du modèle et celles des ré-analyses sont statistiquement significatives.

En ce qui concerne le climat projeté, le nombre de cyclones est en baisse à tous les intervalles de ζ_{gr} et de C_{gr} , par rapport au climat récent (voir figures 3.1.7a et 3.1.7b). Par contre, le nombre des cyclones dont la valeur de P_{NM} est 995 hPa, 1020 hPa et 1025 hPa est en hausse (voir figure 3.1.7c). Ces changements sont-ils statistiquement significatifs ? Les différences peuvent se caractériser comme étant significatives dans la distribution en fonction de la P_{NM} , étant donné que l'hypothèse H_0 est rejetée ($\chi^2 = 66,5$ est plus grand que χ^2_{crit}).

Les critères de position comme la médiane et les quartiles sont employés ici afin de décrire chacun des échantillons. Ces mesures statistiques permettent de désigner la dispersion après élimination, en utilisant l'écart interquartile, de 25 % des valeurs plus faibles et de 25 % des valeurs plus fortes. Selon le tableau 3.1.2, 50 % du nombre total de centres cycloniques, provenant des ré-analyses ($N = 1717$), se caractérisent par les valeurs de ζ_{gr} , de P_{NM} et C_{gr} plus grandes (ou plus petites) de 5,4 CVU, de 1002 hPa et de 11,0 CU, respectivement. En plus, 50 % du nombre de cyclones, situés dans le centre de la distribution, se trouvent dans l'intervalle de Q1 à Q3 (de 3,9 à 7,0 CVU, de 995 et 1008 hPa, et de 7,4 à 15,3 CU). Les valeurs des écarts interquartiles indiquent que la dispersion au sein des distributions n'est pas forte. Bien que légèrement élevées, les caractéristiques des distributions, provenant des simulations du climat récent ($N = 2117$), ainsi que des projections futures de MCG3 ($N = 1865$), concordent avec celles des ré-analyses.

	ζ_{gr}	P_{NM}	C_{gr}	
Validation (1961 à 1990)	41,4	64,2	38,6	χ^2
Changement dans le futur	0,4	66,5	0,8	
	24,7 (dl=10)	24,7 (dl=10)	29,1 (dl=13)	$\chi^2_{crit}^{(0,1)}$

Tableau 3.11 : La statistique du Khi-carré (χ^2) : la validation du MCCG3 et le changement dans le futur concernant la distribution (sans prendre en compte le début et la fin) du nombre de centres cycloniques en fonction de ζ_{gr} et de P_{NM} et de C_{gr} ; dl est le degré de liberté.

	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Q3-Q1	
ERA-40 1961/90	2,5	3,9	5,4	7,0	15,7	3,1	(1 ζ_{gr} CVU)
MCCG3 1961/90	2,5	4,3	5,6	7,3	14,8	3,0	
MCCG3 2041/70	2,5	4,0	5,2	7,0	15,0	3,0	
P_{NM} (hPa)	968	995	1002	1008	1026	13	ERA-40 1961/90
	968	993	1000	1007	1021	14	MCCG3 1961/90
	964	995	1002	1008	1023	13	MCCG3 2041/70
ERA-40 1961/90	1,9	7,4	11,0	15,3	31,5	7,9	(1 C_{gr} CVU)
MCCG3 1961/90	2,2	8,1	12,1	16,9	32,8	8,8	
MCCG3 2041/70	2,2	7,1	11,0	15,4	34,2	8,3	

Tableau 3.12 : Le minimum, le quartile inférieur (Q1), la médiane, le quartile supérieur (Q3), le maximum et l'écart interquartile (Q3-Q1) : la distribution du nombre de centres cycloniques (en hiver, le golfe du Saint-Laurent) en fonction de ζ_{gr} et de P_{NM} et de C_{gr} .

3.2 Activité des cyclones en novembre et en avril

Dans la section précédente, nous avons noté que les changements dans le comportement des cyclones durant les six mois de saison d'hiver (de novembre à avril) sont très faibles en réponse aux conditions un doublement de concentration atmosphérique du CO₂. Par ailleurs, dans cette section nous présentons les statistiques des cyclones pour les mois de novembre et d'avril, séparément.

3.2.1 Densité mensuelle des trajectoires

Climatologie

Les figures 3.2.1 et 3.3.1 illustrent la distribution géographique de la climatologie de la densité mensuelle des trajectoires pour les mois de novembre et d'avril, respectivement.

La plus grande densité des trajectoires en novembre se trouve dans le nord-est du continent (voir figure 3.2.1a). La plupart des cyclones traversant la Baie d'Hudson et le long de la côte Est continuent de se déplacer à travers de la péninsule du Labrador principalement vers le Nord. En conséquence, le maximum dans l'Atlantique s'étend du golfe du Saint-Laurent en poursuivant dans l'océan Arctique.

D'autre part, durant le mois d'avril, quasiment aucun cyclone provenant du Pacifique n'entre pas dans le continent et également pour la baie d'Hudson (voir figure 3.3.1a). La région du maximum de la densité, à la fin de saison, dans l'Atlantique Ouest, s'élargit vers l'intérieur du continent, du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Donc, le maximum (plus de 3 trajectoires par secteur par mois), situé plus au nord au début de la saison, se déplace, vers la fin de saison, sur la surface continentale.

Dans les conditions futures du climat, la densité des trajectoires est légèrement réduite particulièrement le long la côte Est, en novembre (voir figures 3.2.1b et 3.2.1c) aussi qu'en avril (voir figures 3.3.1b et 3.3.1c).

Écart-type

Les figures 3.2.2 et 3.3.2 montrent la distribution géographique de la variabilité annuelle de la densité mensuelle des trajectoires, pour les mois de novembre et d'avril, respectivement.

La variabilité interannuelle de la densité pour ces deux mois se diffère surtout au centre du continent nord-américain. La densité en novembre varie considérablement (environ 2 trajectoires par secteur par hiver) dans la région située entre les Rocheuses canadiennes et les Grands Lacs (voir figure 3.1.2a). Alors que la moyenne est du même ordre, 95 % des densités sont comprises entre zéro et 5 trajectoires. En analysant la moyenne et l'écart-type dans cette région, nous estimons que la densité des trajectoires est comprise entre 0 et 5 trajectoires en novembre, dans 95 % des échantillons, (voir figure 3.3.2a).

Dans les figures 3.2.2b et 3.3.2b, nous voyons que les régions où l'écart-type de novembre et d'avril, respectivement, est relativement grand pourraient se décaler plus au sud et aussi devenir plus étroites dans le futur. En comparant les différences (voir figures 3.2.2c et 3.3.2c), nous pouvons conclure que, bien que les changements projetés soient petits, la densité montrerait plus de variabilité en avril.

3.2.2 Vitesse caractéristique de déplacement

Les figures 3.2.3 et 3.3.3 illustrent la distribution géographique de la vitesse caractéristique de déplacement durant les mois de novembre et d'avril, respectivement.

Les cyclones extra-tropicaux parcourent le sud de l'Amérique du Nord durant le mois de novembre à une vitesse typique d'environ 50 km h^{-1} . Elle devient plus grande vers les latitudes moyennes, plus de 60 km h^{-1} , d'où commence à diminuer au point d'être plus petite que 30 km h^{-1} , dans les régions nordiques (voir figure 3.2.3a). Dans le cas du mois d'avril, les cyclones se déplacent plus lentement (environ 50 km h^{-1}) en suivant une distribution moins régulière (voir figure 3.3.3a). Les cyclones de la côte orientale se déplacent en général plus rapidement que ceux de la côte occidentale.

Dans les conditions projetées du climat, les changements seraient différemment répartis pour le début et la fin de saison (voir figures 3.2.3b et 3.3.3b). Les cyclones deviendraient plus rapides en novembre (plus de 50 km h^{-1}), particulièrement dans la région de l'Arctique (voir figure 3.2.3c). La situation en avril pourrait être contraire de sorte que la vitesse caractéristique de déplacement serait en baisse, à l'exception du Québec et la côte Est des États-Unis (voir figure 3.3.3c).

3.2.3 Tourbillon caractéristique

Les figures 3.2.4 et 3.3.4 illustrent la distribution géographique du tourbillon ζ_{gr} caractéristique durant les mois de novembre et d'avril, respectivement.

La comparaison entre les figures, 3.2.4a et 3.3.4a, implique qu'en novembre, des zones d'un relativement fort tourbillon (plus de 4,5 CVU) sont au sud-ouest et au nord-est de l'Amérique. En avril, par contre, elles sont déplacées plus au sud. Cette distribution projetée serait sans changements majeurs lors du doublement de la concentration atmosphérique en CO_2 , sauf que le tourbillon serait en basse dans l'Atlantique. Ceci cependant pourrait être associé à une amplification tout au long de la côte orientale du continent (voir figures 3.2.4b et 3.2.4c, et 3.3.4a et 3.3.4c).

3.2.3 Circulation cyclonique caractéristique

Les figures 3.2.5 et 3.3.5 illustrent la distribution géographique de la circulation C_{gr} caractéristique durant les mois de novembre et d'avril, respectivement.

En général, les cyclones se caractérisent par une plus forte circulation en novembre (voir figure 3.2.5a) qu'en avril (voir figure 3.3.5a). Des régions de forte circulation se décalent vers le sud du continent ce qui concorde avec la distribution du tourbillon. Il faut noter aussi que les régions influencées par les cyclones bien développés se trouvent, en novembre, au nord du continent, tandis qu'en avril au sud-ouest. Le doublement de concentration atmosphérique en CO_2 pourrait changer cette distribution de façon à amplifier la circulation cyclonique, surtout au Nord du continent (voir figures 3.2.5b et 3.2.5c, et 3.3.5a et 3.3.5c).

Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons évalué les changements du comportement des cyclones de l'Amérique du Nord, en réponse d'une hausse de la concentration atmosphérique en CO_2 . À l'aide des simulations provenant de MCG3, nous avons calculé un certain nombre de statistiques sur 30 ans simulés. La première section a été consacrée aux statistiques pour la saison d'hiver (de novembre à avril). En plus, nous avons mis en évidence une analyse des distributions du nombre de cyclones en fonction de certains paramètres, pour un cas particulier. La deuxième a inclus par contre les statistiques pour les mois de novembre et d'avril afin d'examiner l'activité cyclonique au début et à la fin de saison étudiée. Nous avons comparé des résultats du climat récent à ceux du climat projeté selon le scénario SRES A2 du GIEC appliqué au modèle MCG3. Selon les résultats présentés, nous pouvons conclure qu'il n'y a pas de changement important projeté des caractéristiques moyennes des cyclones d'hiver. Par contre, le comportement des cyclones au début et à la fin de saison est légèrement changé.

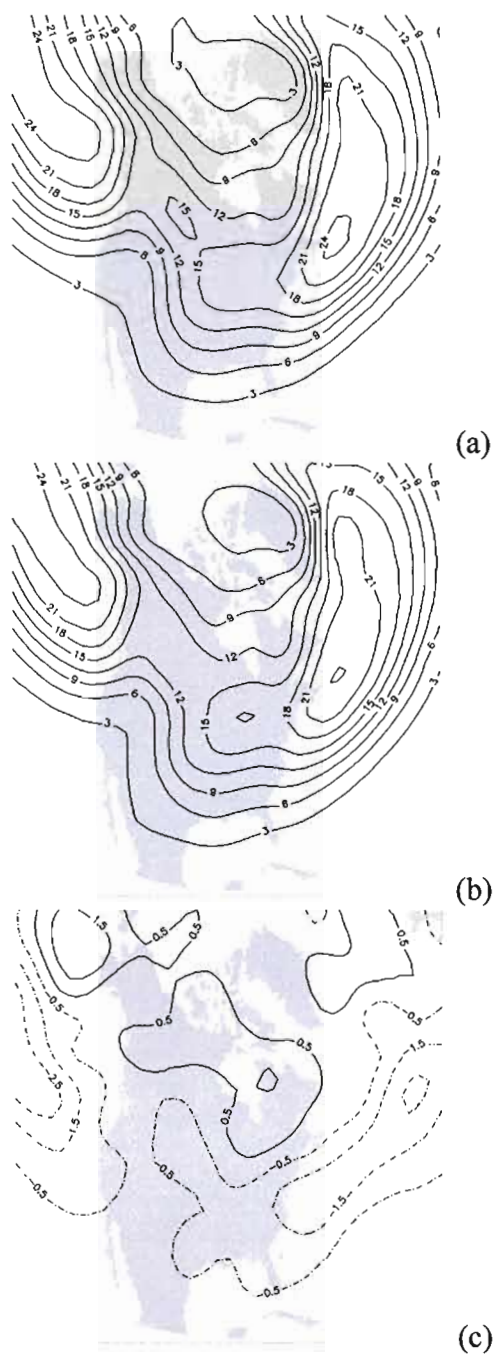


Figure 3.1.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à toutes les 3 trajectoires (a)-(b), et à l'intervalle de 1 trajectoire (c) par cercle de rayon de 333 km par saison, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

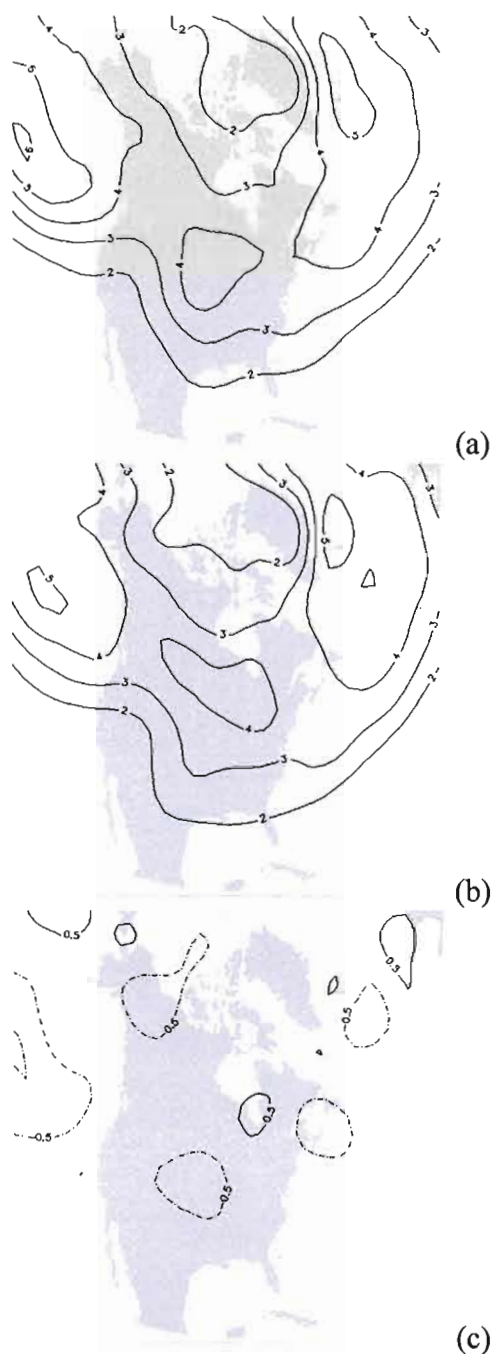


Figure 3.1.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (NDJFMA) : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire par cercle de rayon de 333 km par saison, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

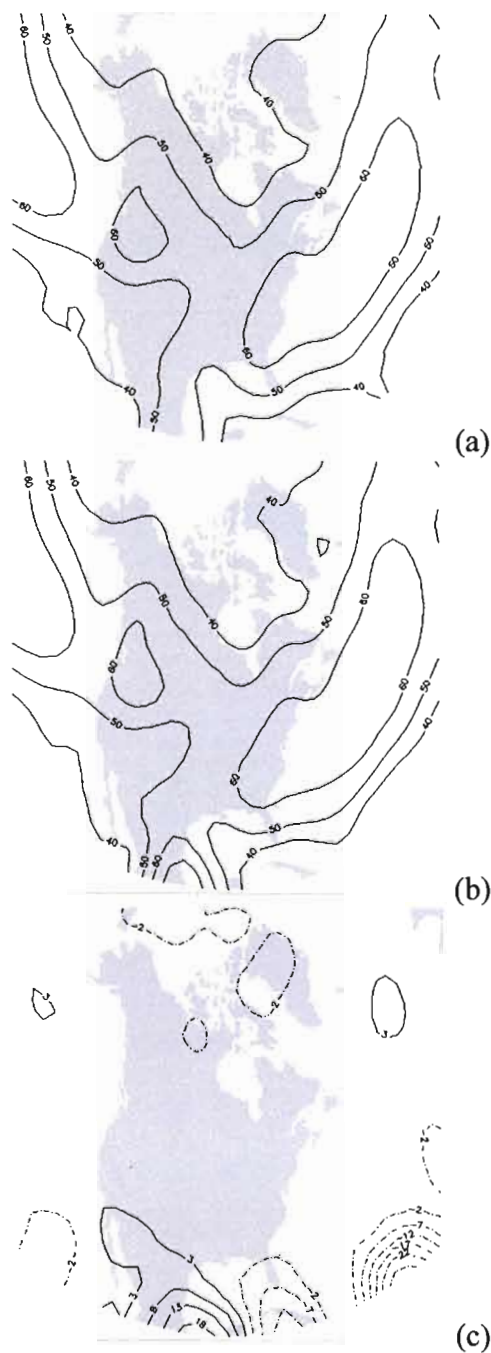


Figure 3.1.3 : V_{cyc} caractéristique pour NDJFMA : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h⁻¹ pour (a)-(b), et à tous les 5 km h⁻¹ pour (c) à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traites tiretés.

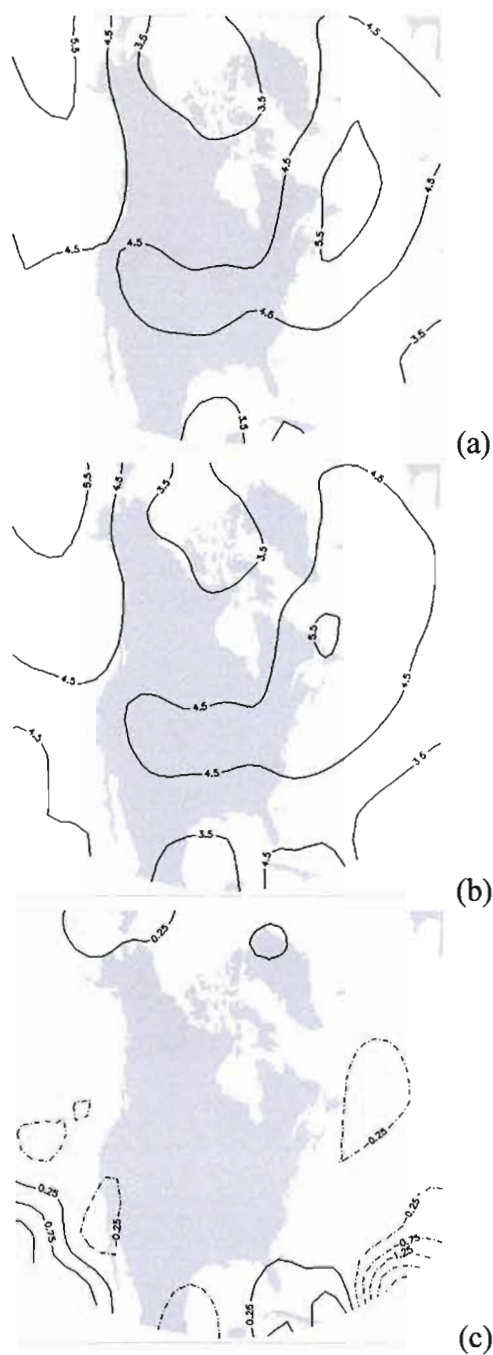


Figure 3.1.4 : ζ_{gr} caractéristique pour NDJFMA : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

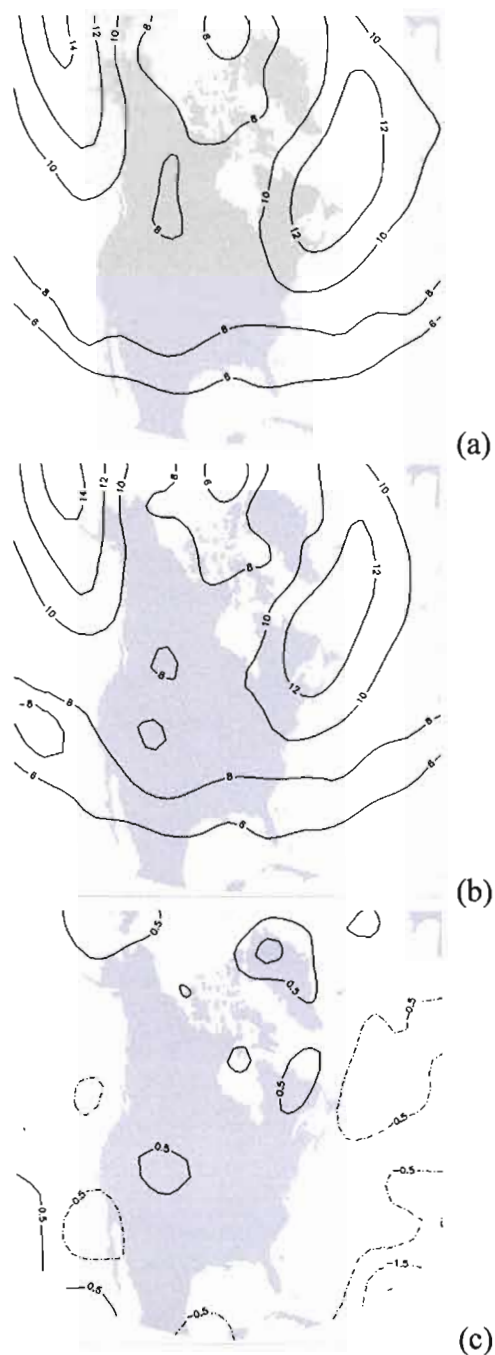


Figure 3.1.5 : C_{gr} caractéristique pour NDJFMA : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

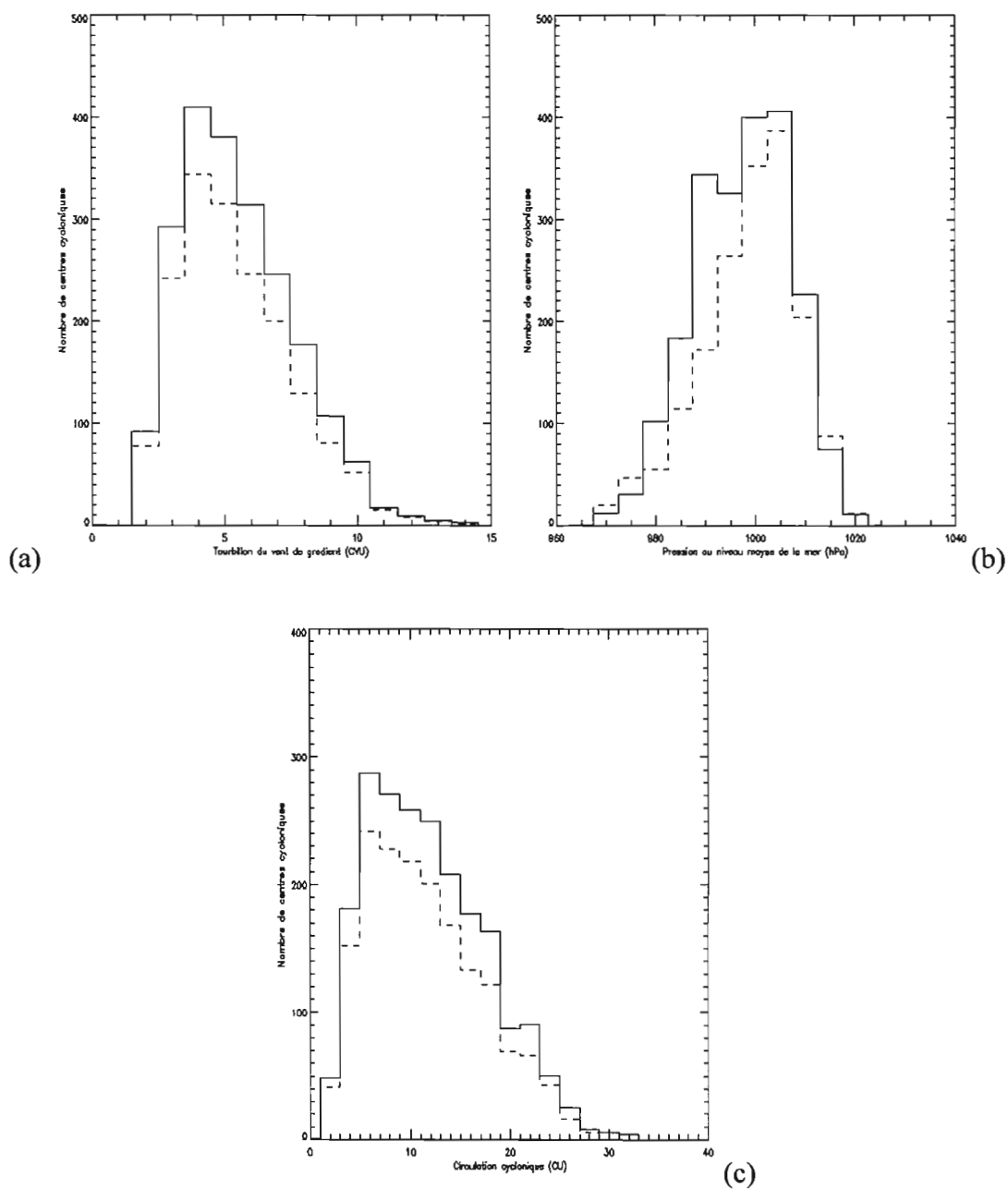


Figure 3.1.6 : Distribution du nombre de cyclones hivernaux en fonction de (a) les valeurs centrales de ζ_{gr} , (b) les valeurs centrales de P_{NM} , et (c) de C_{gr} , pour le secteur d'intérêt situé dans la région du golfe du Saint Laurent (1961 à 1990). Les lignes plaines correspondent aux simulations du MCG3, et les lignes tiretées joignent les ré-analyses ERA-40.

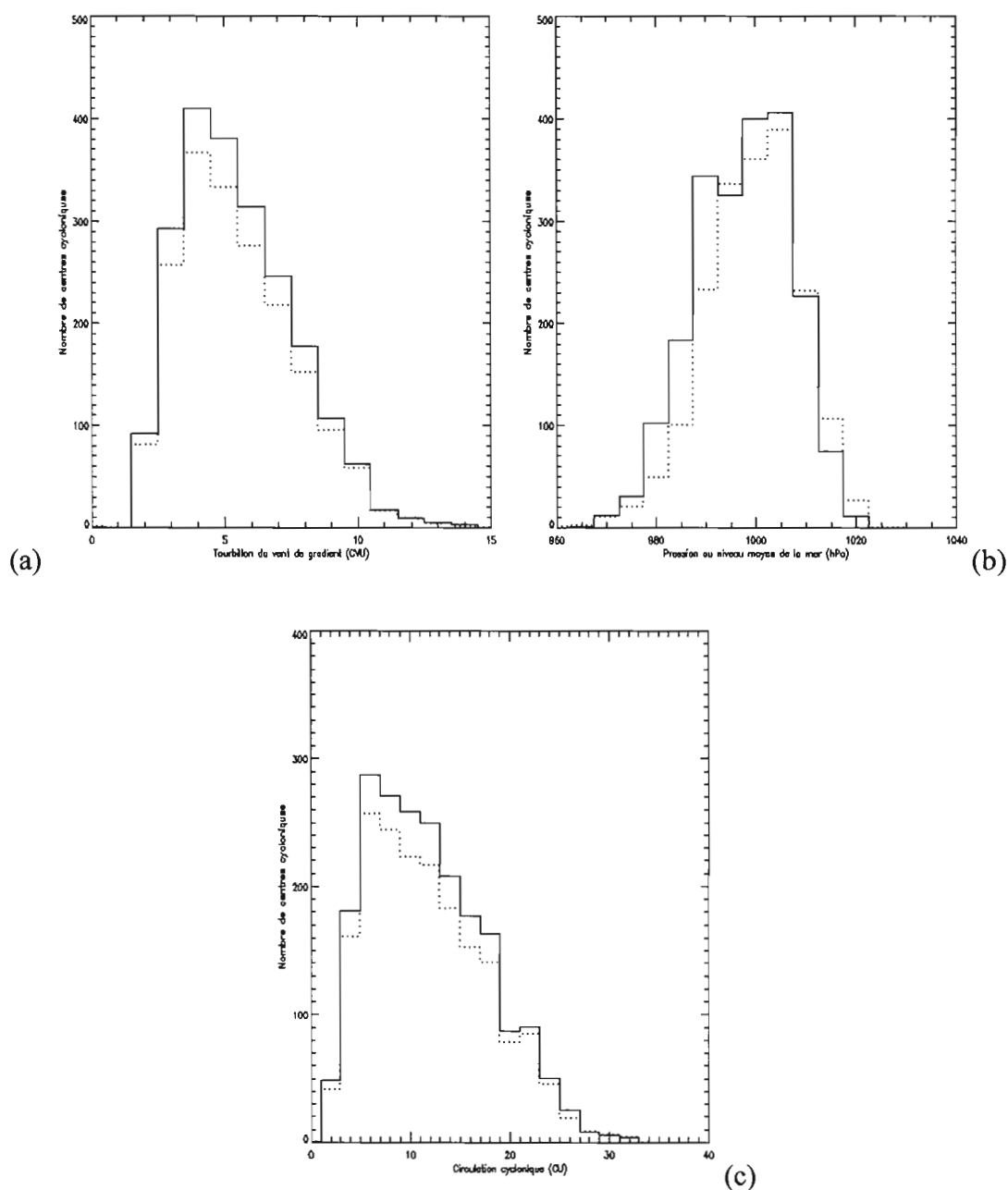


Figure 3.1.7 : Distribution du nombre de cyclones hivernaux en fonction de (a) les valeurs centrales de ζ_{gr} , (b) les valeurs centrales de P_{NM} , et (c) de C_{gr} , pour le secteur d'intérêt situé dans la région du golfe du Saint Laurent. Les lignes plaines correspondent aux simulations (1961 à 1990), et les lignes pointillées aux projections (2041 à 2070) du MCCG3.

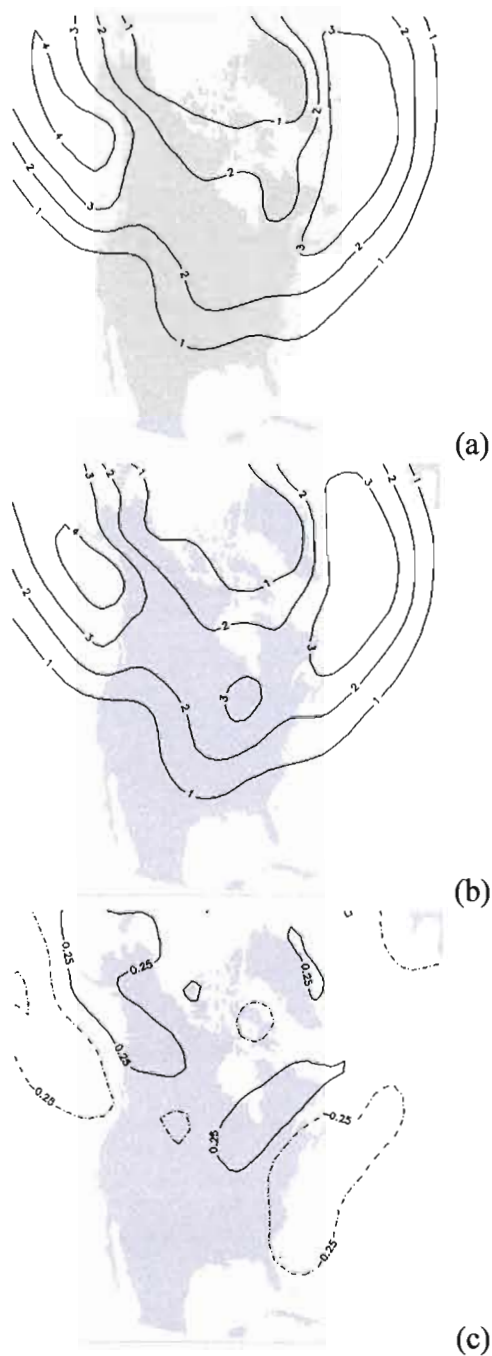


Figure 3.2.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones en novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire pour (a) et (b), et de 0,5 trajectoire pour (c) par cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

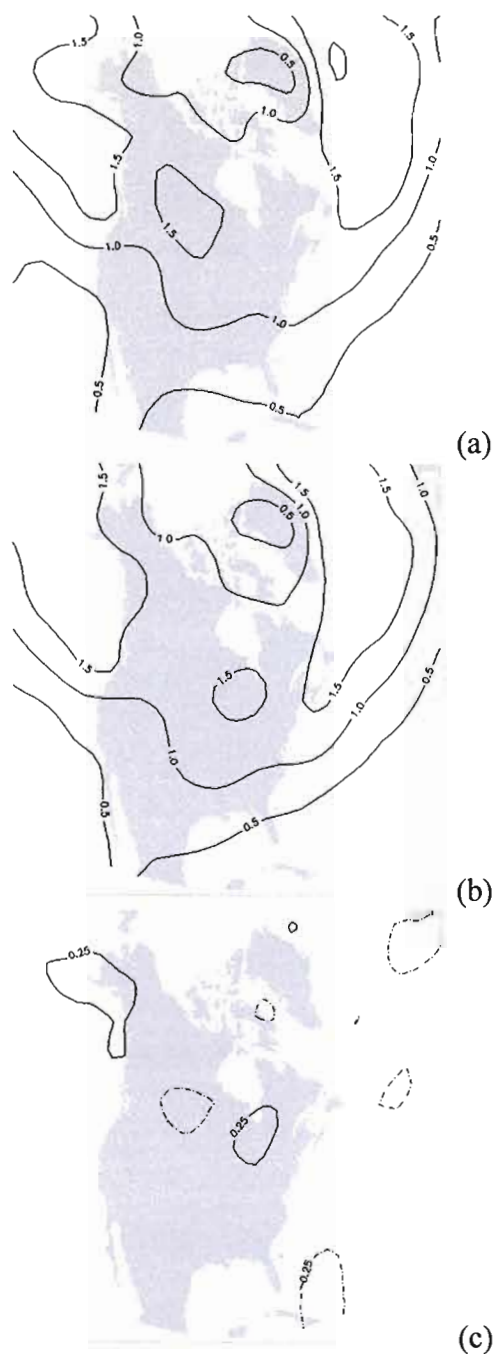


Figure 3.2. 2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclone en novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par le cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

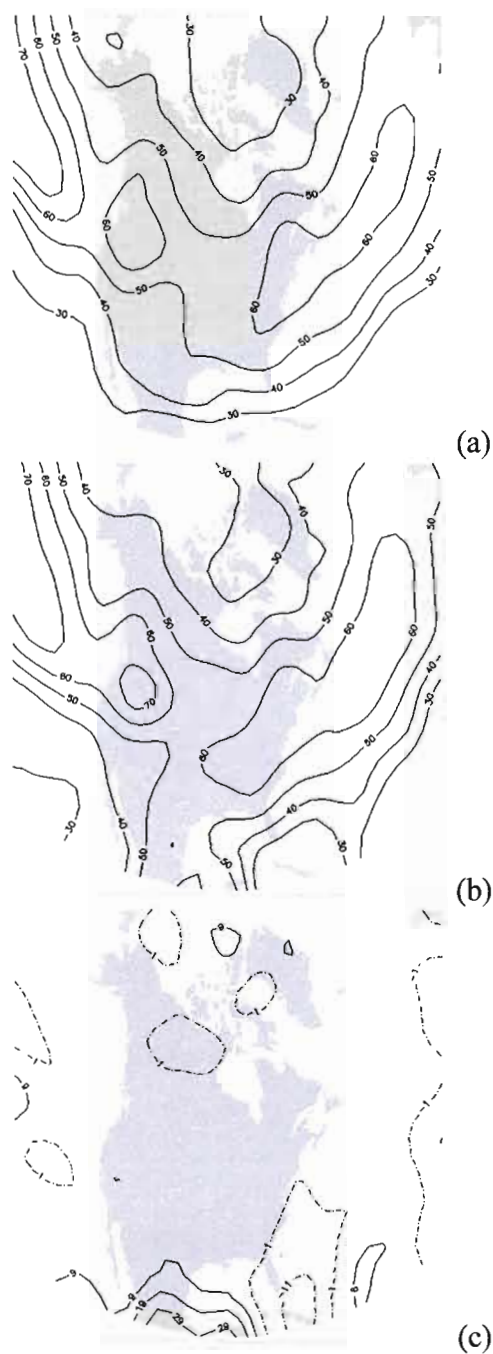


Figure 3.2.3 : V_{cyc} caractéristique pour novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

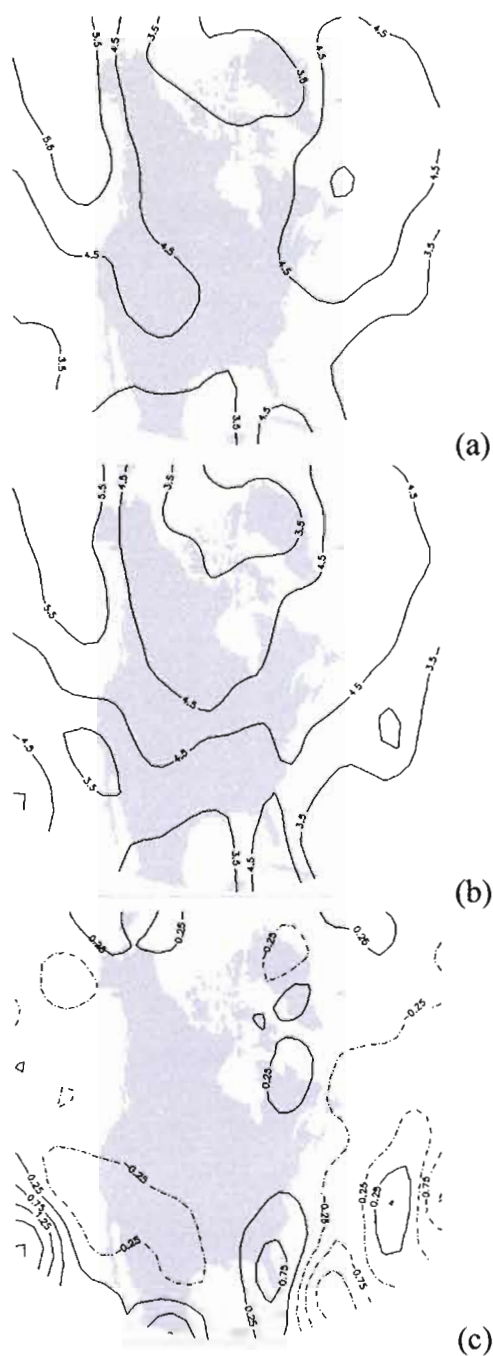


Figure 3.2.4 : ζ_{gr} caractéristique pour novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

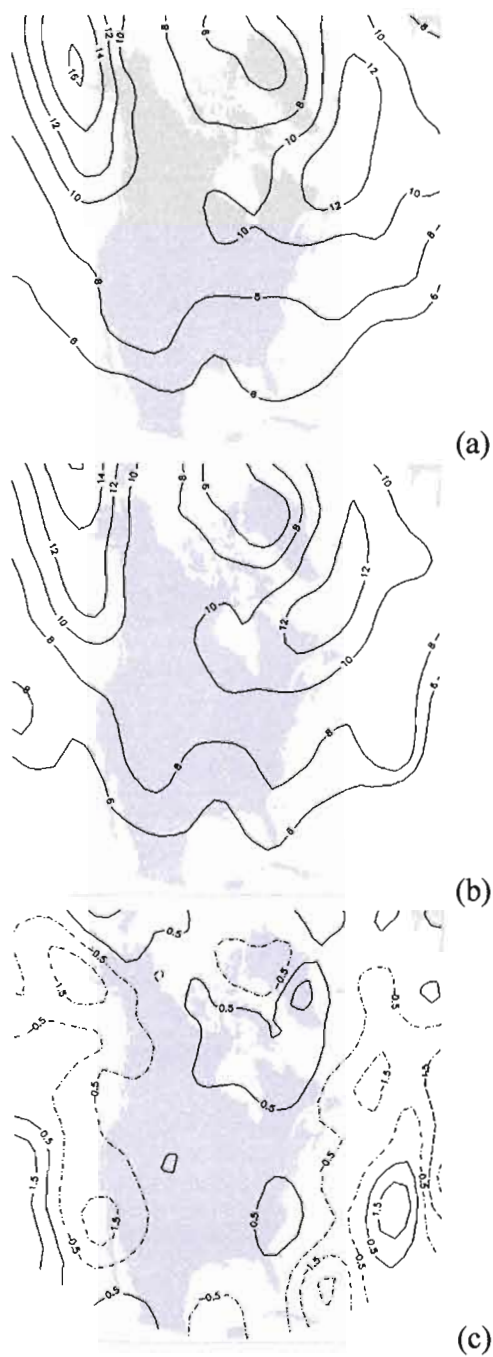


Figure 3.2. 5 : C_{gr} caractéristique pour novembre : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a)-(b), et à chaque $1 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

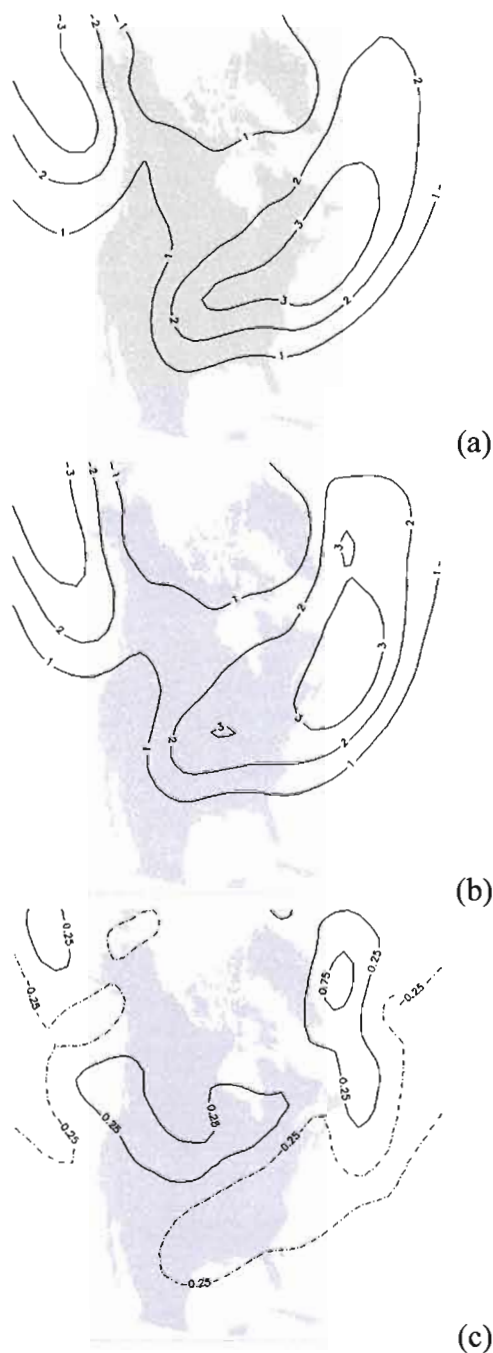


Figure 3.3.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones en avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 1 trajectoire pour (a) et (b), et de 0,5 trajectoire pour (c) par cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

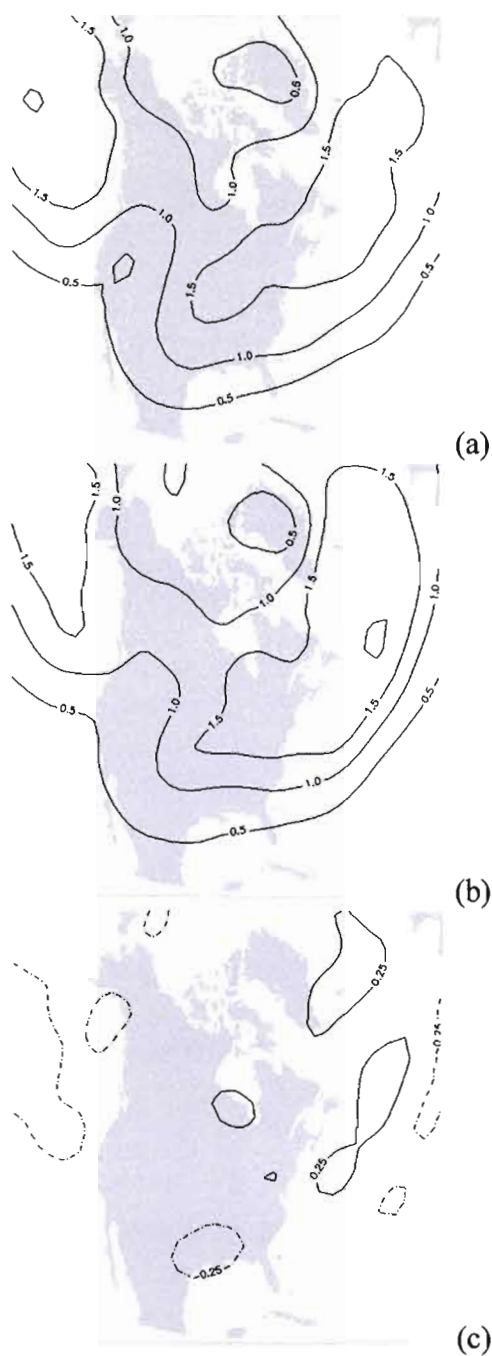


Figure 3.3.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones en avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

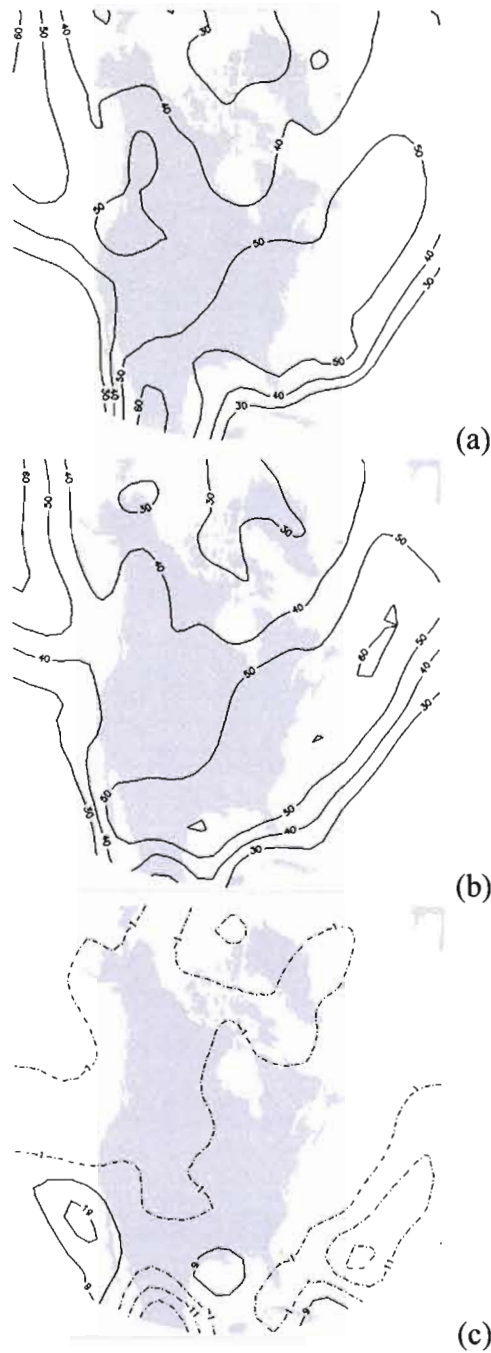


Figure 3.3. 3 : V_{cyc} caractéristique pour avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

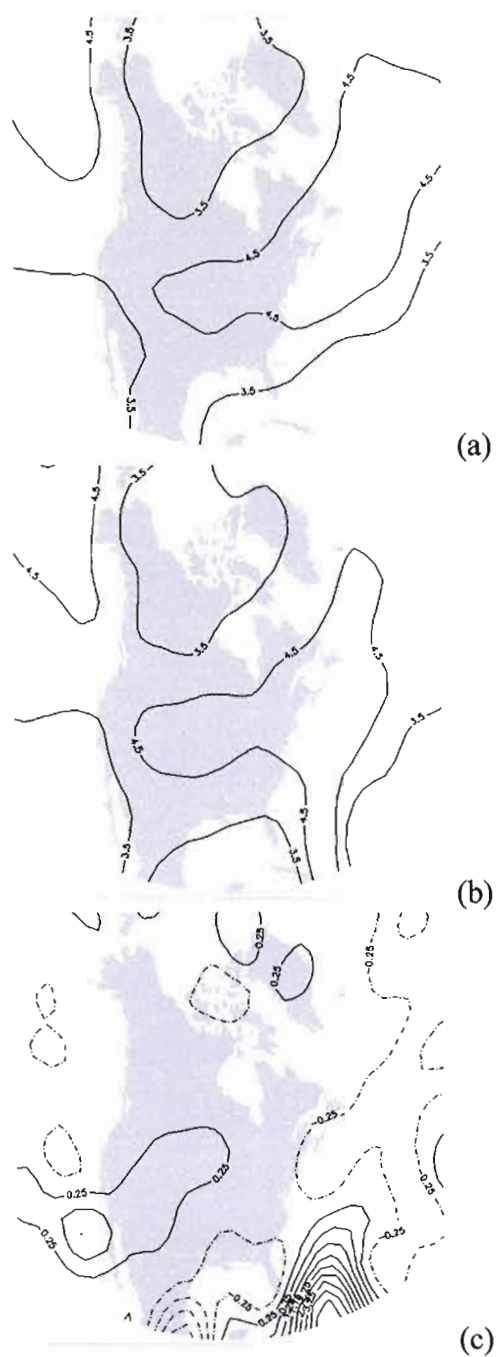


Figure 3.3.4 : ζ_{gr} caractéristique pour avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

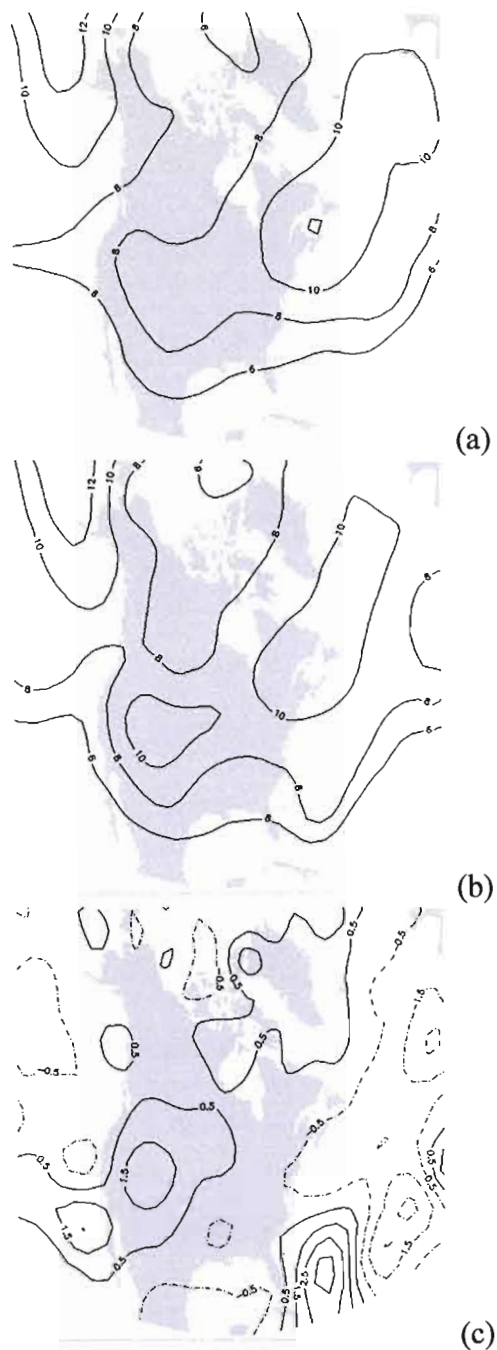


Figure 3.35 : C_{gr} caractéristique pour avril : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $1 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

CONCLUSION

Le temps journalier et le climat à l'extérieur des régions équatoriales sont influencés par les cyclones extra-tropicaux. Bien souvent, ces systèmes d'échelle synoptique s'associent aux événements extrêmes comme les inondations et les sécheresses. En réponse à une augmentation des GES, la plupart des études effectuées à l'aide des MCG indiquent un réchauffement troposphérique plus grand dans les régions polaires et sur les continents, en hiver (IPCC, 2001). Par conséquent, le transfert méridien de chaleur pourrait être changé de manière à réduire le nombre de cyclones extra-tropicaux mais aussi à augmenter leur intensité.

Cette étude a eu pour objectif l'analyse comparative de certaines caractéristiques des cyclones extra-tropicaux. La première tâche a été d'évaluer l'habileté de MCG3 à bien modéliser les répercussions climatiques à grande échelle aux forçages anthropiques. La validation de MCG2 et puis de MCG3 par les réanalyses ERA-40 a précédé l'intercomparaison entre ces deux dernières générations de MCG canadien, pour la période de 1961 à 1990. L'estimation du changement anticipé de l'activité cyclonique en réponse à l'augmentation de la concentration des GES a été notre deuxième tâche. Les projections de MCG3, selon le scénario SRES A2 du GIEC, ont servi pour estimer le comportement des cyclones dans la période de 2041 à 2070.

La méthodologie a compris plusieurs étapes. Le géopotential à 1000 hPa, l'orographie et le vent à 500 hPa ont été introduits dans l'algorithme de Sinclair afin d'identifier (aux 6 heures) et suivre les cyclones extra-tropicaux. Le centre cyclonique est défini comme étant un maximum local du ζ_{gr} à 1000 hPa. Chaque trajectoire est spécifiée par les positions géographiques du centre (latitude, longitude), ainsi que par les valeurs correspondantes de ζ_{gr} , de P_{NM} , de C_{gr} et de EP . Nous avons

traité les deux familles d'ensembles de trajectoires, la primordiale est pour l'hiver (novembre à avril) et la seconde est pour l'été (mai à octobre). Le domaine est situé dans l'hémisphère Nord (au nord du 20°N). La procédure du calcul statistique est réalisée par une approche basée sur celle de Rosu (2005). Les cyclones stationnaires ont été retirés à l'aide des conditions comme la longueur minimale de trajectoires est au moins de 1200 km, et la distance la plus petite entre la position initiale et la position finale est au moins de 600 km.

Afin de décrire l'activité cyclonique d'une manière plus réaliste, il fallait prendre en compte une assez longue période climatique d'au moins 30 ans. En utilisant la moyenne climatologique de la densité des trajectoires, nous avons identifié les régions où les cyclones sont plus fréquents ainsi que leurs directions principales de déplacement. La densité des trajectoires est définie par le nombre des trajectoires traversant au moins 333 km sur n'importe quels points de grille (le secteur d'intérêt). Dans cette étude, la variabilité interannuelle est représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires. Les régions les plus visitées par les cyclones ont aussi la plus grandes variations d'une saison à l'autre. En ce qui concerne le signal des événements climatiques comme le NAO et le SO, leurs phases positive et négative notamment contribuent au changement du nombre des cyclones.

En addition, la nature des cyclones pourrait se décrire par une valeur spécifique du tourbillon, de la pression, de la circulation cyclonique et de l'eau précipitable. Les régions de l'Atlantique Nord-Ouest et du Pacifique Nord-Est, et par conséquent des régions côtières, sont le plus influencées par le passage de grands cyclones et intenses, mais pas trop rapides (environ 40 km h⁻¹).

À titre de la validation de MCCG3, des mesures statistiques des caractéristiques des cyclones sont présentées pour la période de 1961 à 1990. En comparant tous les résultats, nous avons remarqué que les cyclones extra-tropicaux sont plus nombreux et plus intenses en hiver qu'en été. En plus, ils sont

raisonnablement bien simulés par MCCG3 tout particulièrement en hiver où il y a un écart assez acceptable par rapport aux ré analyses. Par contre, pour la saison estivale, nous n'avons pas noté d'amélioration notable en reproduction des cyclones comparativement à MCCG2.

L'étude des projections des changements climatiques comporte les trois parties. Premièrement, la comparaison entre des statistiques calculées sur la période du climat récent et celles du climat futur, est concédée. Donc, nous avons constaté que l'activité cyclonique généralement montre une faible tendance à la baisse, en hiver, en Amérique de Nord. Deuxièmement, une zone du Golfe du Saint-Laurent a été mise au point d'une façon plus détaillée. Nous avons appliqué un test de signifiante de la différence entre les deux périodes climatiques concernant les trois fonctions de classement pour les valeurs centrales de ζ_{gr} , de C_{gr} et de P_{NM} . Le test du Khi-carré a indiqué alors que seulement la différence en distribution de P_{NM} est statistiquement significative. Dans la dernière partie, nous avons présenté des caractéristiques des cyclones pour le début et la fin de saison hivernale, le novembre et l'avril. Selon les résultats présentés, nous pouvons conclure qu'en hiver, il n'y a pas de changements importants projetés des caractéristiques moyennes des cyclones, en réponse à l'augmentation de la concentration du CO_2 .

La méthode appliquée pour calculer des mesures statistiques contient des faiblesses. En premier lieu, le choix du secteur d'intérêt (l'aire couverte par le cercle du rayon de 333 km) est un peu discutable puisque plusieurs secteurs partagent une petite zone dont la taille s'agrandit lorsque la latitude augmente. La distribution géographique des cyclones extra-tropicaux ainsi donnait une image générale de leur comportement. Mais, afin de réaliser une expertise plus objective concernant une région spécifiée, nous suggérons fortement de l'extraire sous la forme flatteuse et donc de la traiter indépendamment. En deuxième lieu, la répartition en deux saisons opposées s'est révélée moins précise du fait du signal perdu des cyclones en saisons

de transition. Il serait donc préférable de qualifier les cyclones selon les quatre périodes de l'année, pour avoir plus de détails sur leur intervalle d'existence. Entre autres, des variations spatio-temporelles ainsi que des extrêmes de température, d'humidité et de vent près de la surface, conduiront à une compréhension plus exacte du changement possible du régime cyclonique actuel.

APPENDICE A

CALCUL DE ζ_{gr} DANS L'ALGORITHME DE SINCLAIR

La méthode de calcul de ζ_{gr} sur une surface isobarique p , aux points de grille, comprend plusieurs étapes. Il faut d'abord déterminer le champ de vent géostrophique $V_g = (u_g, v_g)$ en utilisant celui de géopotentiel (Φ) à niveau p :

$$\Phi = g \cdot H \quad (A.1)$$

$$u_g = -\frac{1}{f} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right]_p, \quad v_g = \frac{1}{f} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right]_p \quad (A.2)$$

où H est la hauteur du géopotentiel à niveau p ; $g = const. = 9,80665 \text{ m s}^{-2}$ est l'accélération gravitationnelle ; $f = 2\Omega \sin \phi$ est le paramètre de Coriolis, avec la vitesse angulaire de rotation de la Terre $\Omega = 0,7292 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, et la latitude ϕ ; $\frac{\partial}{\partial x} \approx \frac{1}{a} \cos \phi \frac{\partial}{\partial \lambda}$ et $\frac{\partial}{\partial y} \approx \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi}$ (ϕ et λ représentent la latitude et la longitude, en radians, respectivement ; et $a = 6370 \cdot 10^3 \text{ km}$ est le rayon moyen de la Terre).

La démarche se poursuit par le calcul du vent de gradient (V_{gr}) de manière itérative. Premièrement, le terme de courbure des isohypses (K) se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$K = \frac{\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 - 2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2}{\left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{A.3})$$

Ce terme ($K > 0$, dans l'hémisphère Nord) sert à estimer le nombre de Rossby R_o :

$$R_o = \min \left\{ 0,5; \max \left(0,25; K \frac{V_g^{n-1}}{f} \right) \right\} \quad (\text{A.4})$$

où n est le nombre d'itérations (limité à 5) ; pour $n = 1$, $V_{gr} = V_g$.

$$V_{gr} = \frac{V_g^n}{1 + R_o} \quad (\text{A.5})$$

Dans la dernière étape, le champ de ζ_{gr} se calcule à l'aide de celui de V_{gr} :

$$\zeta_{gr} = \frac{\partial v_{gr}}{\partial x} - \frac{\partial u_{gr}}{\partial y} + u_{gr} \frac{\tan \phi}{a} \quad (\text{A.6})$$

Le schéma pour suivre les centres identifiés nécessite la pression réduite au niveau moyen de la mer (P_{NM}). L'équation hypsométrique est sous forme simplifiée puisque à la surface, Φ tend vers zéro :

$$P_{NM} = 1000 \cdot \left(1 + \frac{\Phi}{R_d T} \right) \quad (\text{A.7})$$

où T est la température (en °K) calculée par une fonction co-sinusoidale de latitude.

APPENDICE B

ÉVOLUTION FUTURE DES CYCLONES ESTIVAUX

Les figures marquées par des lettres **a** et **b** exposent les statistiques des cyclones d'été (mai à octobre). Ces valeurs sont calculées à partir des simulations (1961 à 1990 : climat de référence) et des projections (2041 à 2070 : climat projeté) du MCG3, respectivement. Le changement du climat entre ces deux périodes est présenté par la lettre **c**.

Les différences des statistiques entre ces deux périodes climatiques sont distribuées de façon semblable que celles des cyclones d'hiver.

En général, dans les conditions d'une hausse de la concentration du CO₂ atmosphérique, MCG3 ne simule pas de changements importants du comportement des cyclones migratoires en saison estivale.

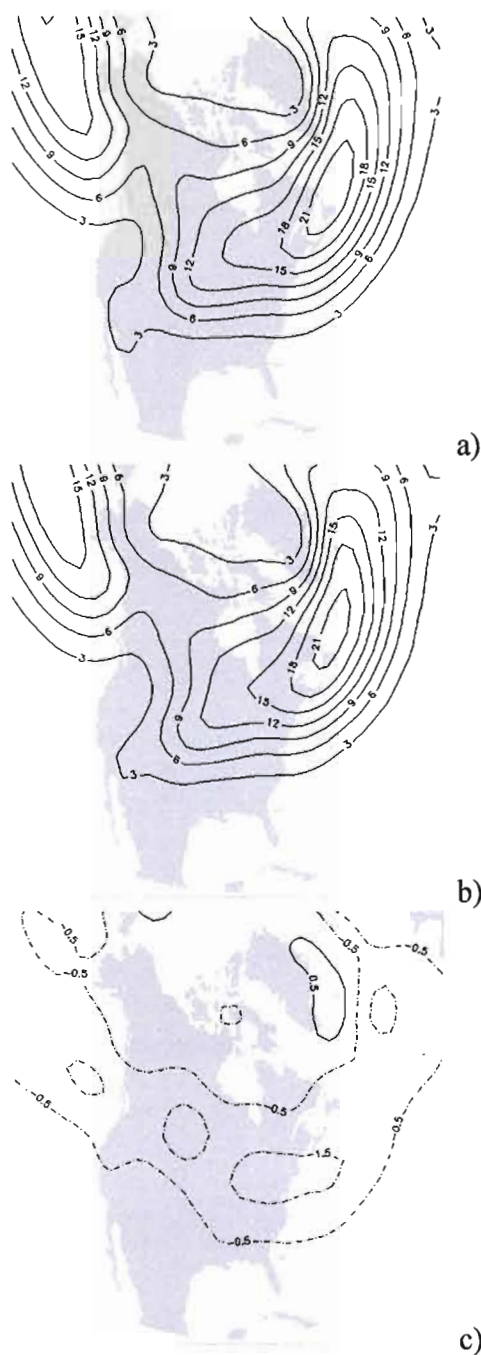


Figure B.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones estivaux (MJJASO) : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires pour (a) et (b), et de 1 trajectoire (c) par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

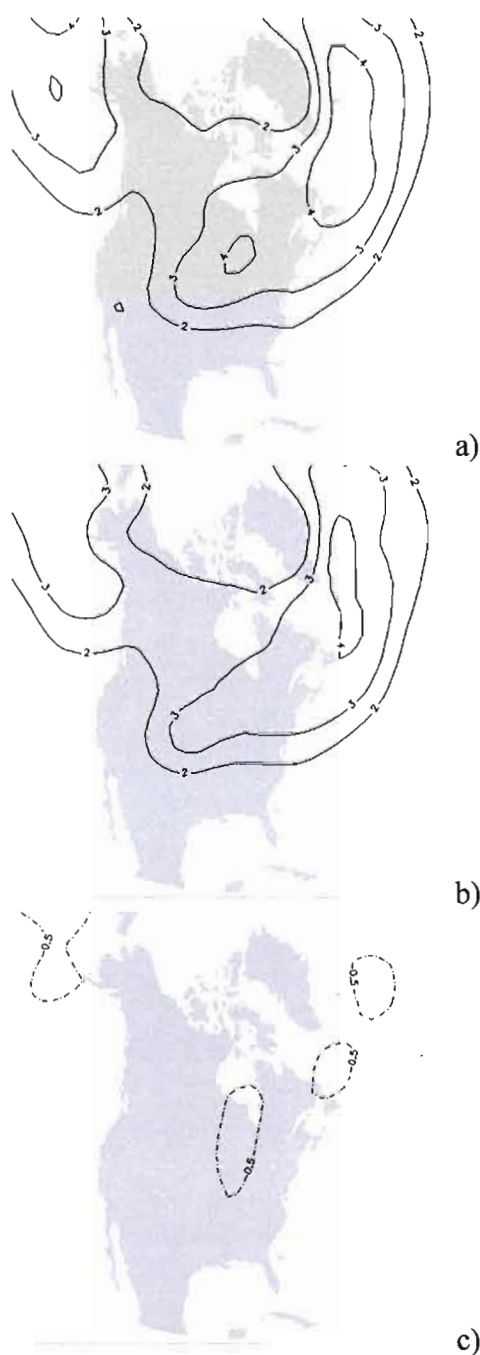


Figure B.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones estivaux (MJJASO) : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 3 trajectoires (a) et (b), et de 1 trajectoire pour (c) par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

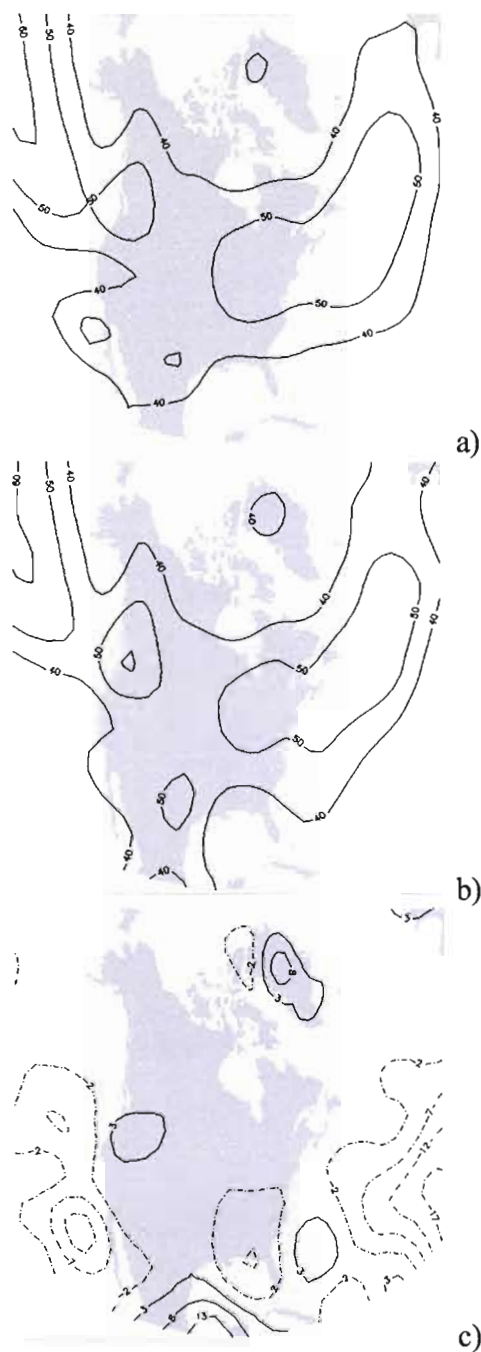


Figure B.3 : V_{cyc} climatologique pour MJJASO : (a) 1960 à 1990, (b) 2040 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} pour (a)-(b), et à tous les 5 km h^{-1} pour (c) à travers cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traites tiretés.

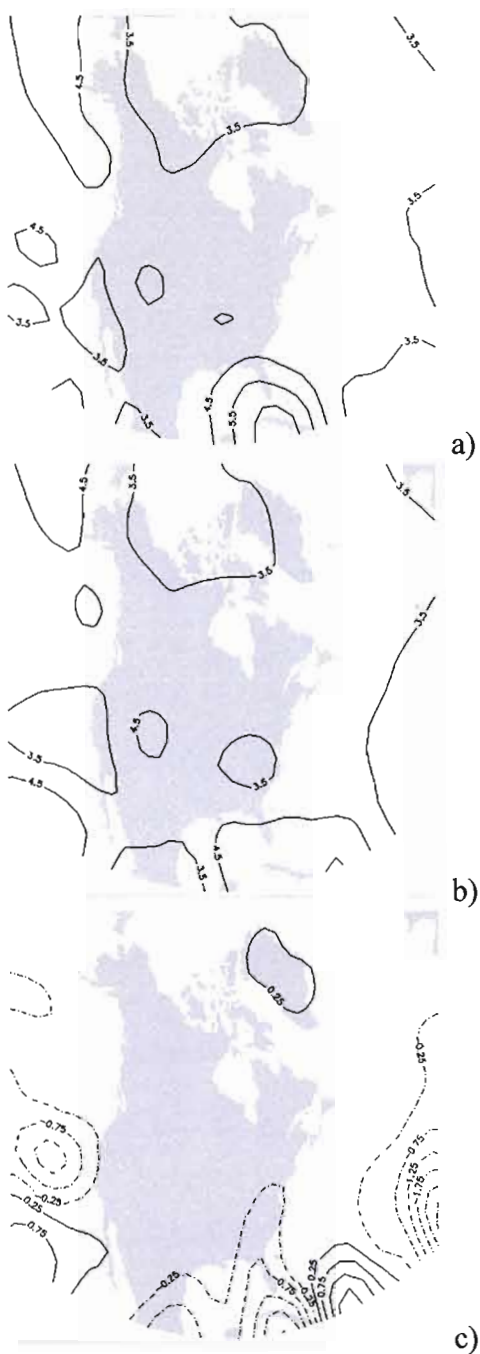


Figure B.4 : ζ_{gr} climatologique pour MJJASO : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traites tiretés.

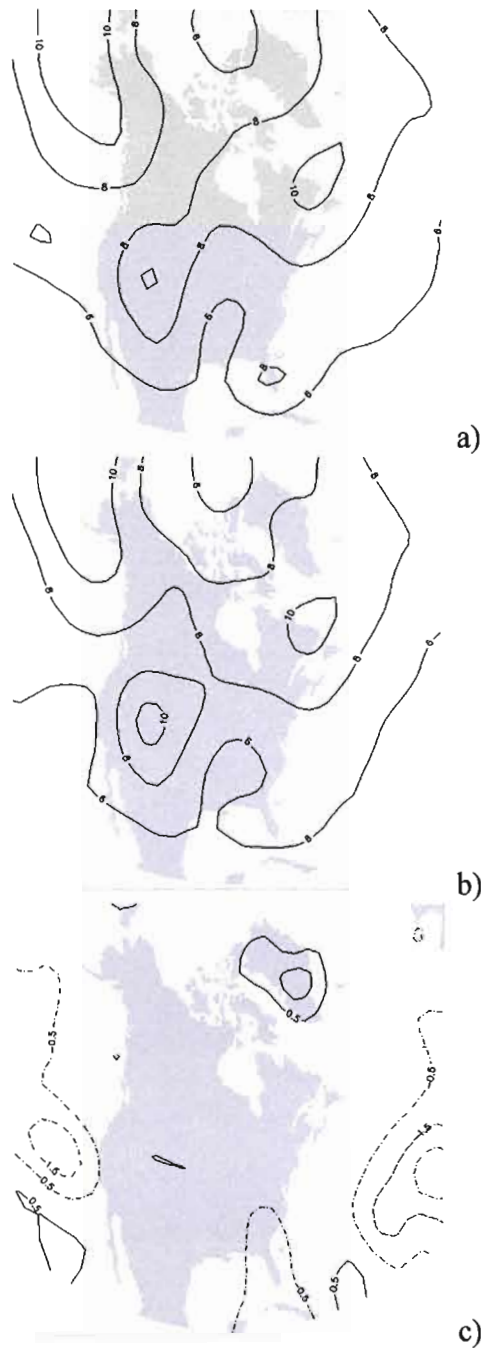


Figure B.5 : C_{gr} climatologique pour MJJASO : (a) 1961 à 1990, (b) 2041 à 2070, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

APPENDICE C

VALIDATION : NOVEMBRE ET AVRIL

Les figures marquées par des lettres **a** et **b** exposent les statistiques mensuelles des cyclones extra-tropicaux, qui sont effectuées à partir des ré-analyses ERA-40 et des simulations du MCGG3, respectivement. La différence entre les statistiques du MCGG3 et celles des ré-analyses ERA-40 est présentée par la lettre **c**.

Pour les mois de novembre et d'avril, MCGG3 surestime la valeur moyenne et la variabilité interannuelle des cyclones, au-dessus des Rocheuses et dans Atlantique Nord-Est. La vitesse caractéristique de déplacement des cyclones est sous-estimée au-dessus du continent nord-américain. D'autre part, le tourbillon et la circulation caractéristiques sont surestimés, dans la partie ouest en novembre, et dans la partie est du domaine d'étude en avril.

Cette analyse a mis en évidence la surestimation de l'activité cyclonique, notamment dans les régions montagneuses, par MCGG3.

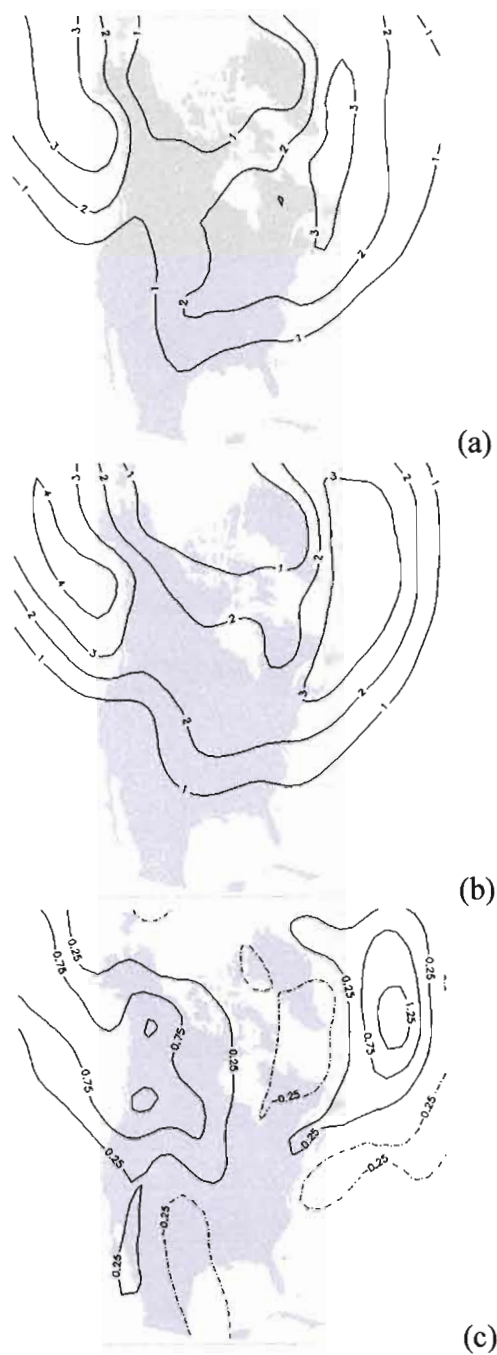


Figure C.1.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones en novembre, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

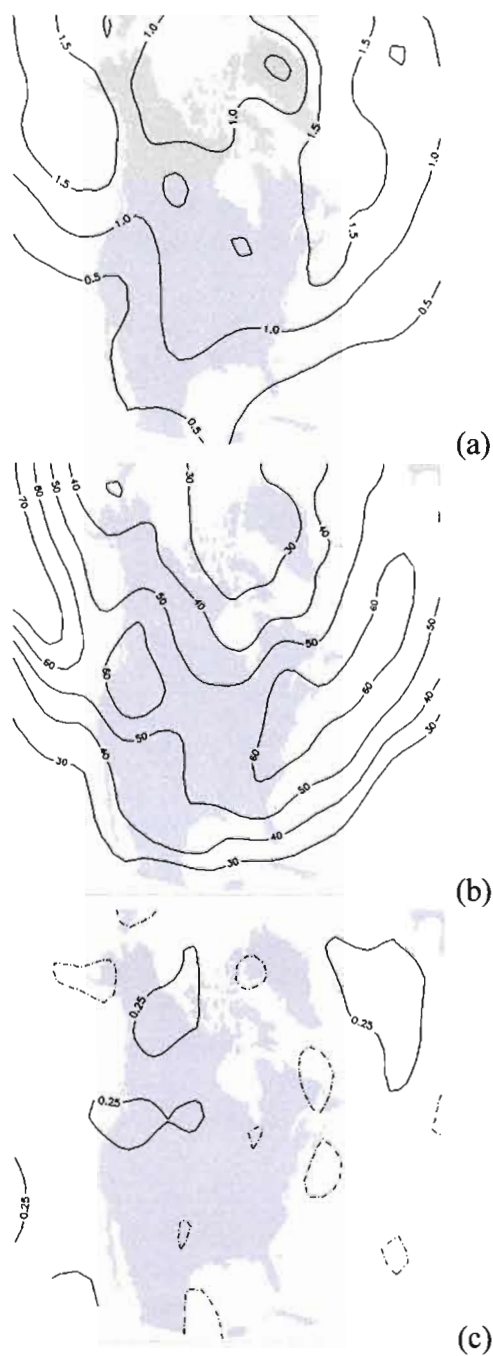


Figure C.1.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones en novembre, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

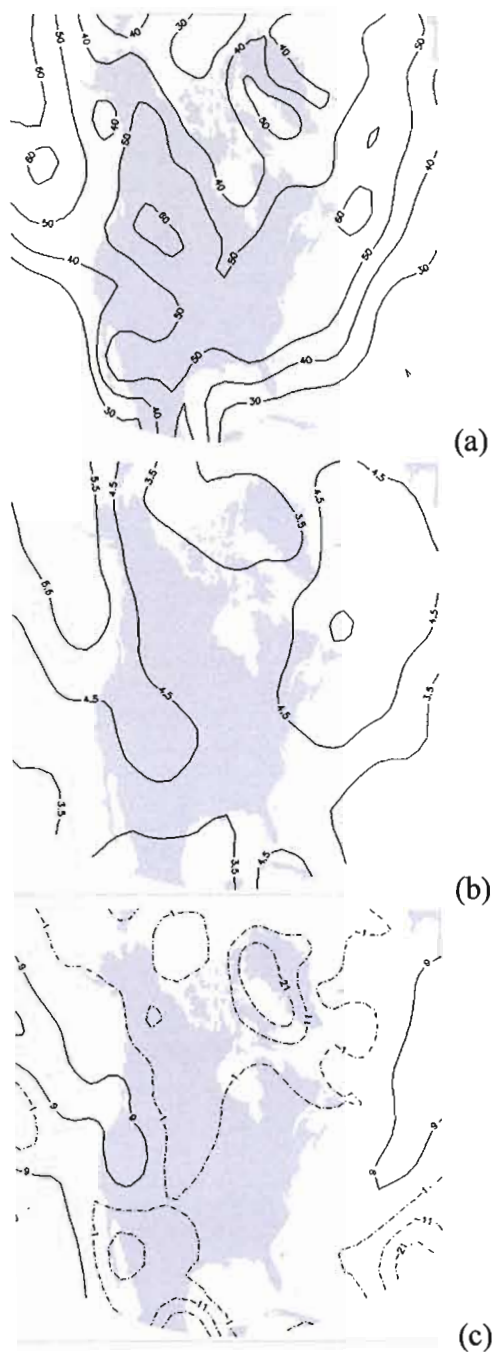


Figure C.1.3 : V_{cyc} caractéristique pour novembre, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h^{-1} à travers cercle de rayon de 333 km pour (a) et (b), et à tous les 5 km h^{-1} pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

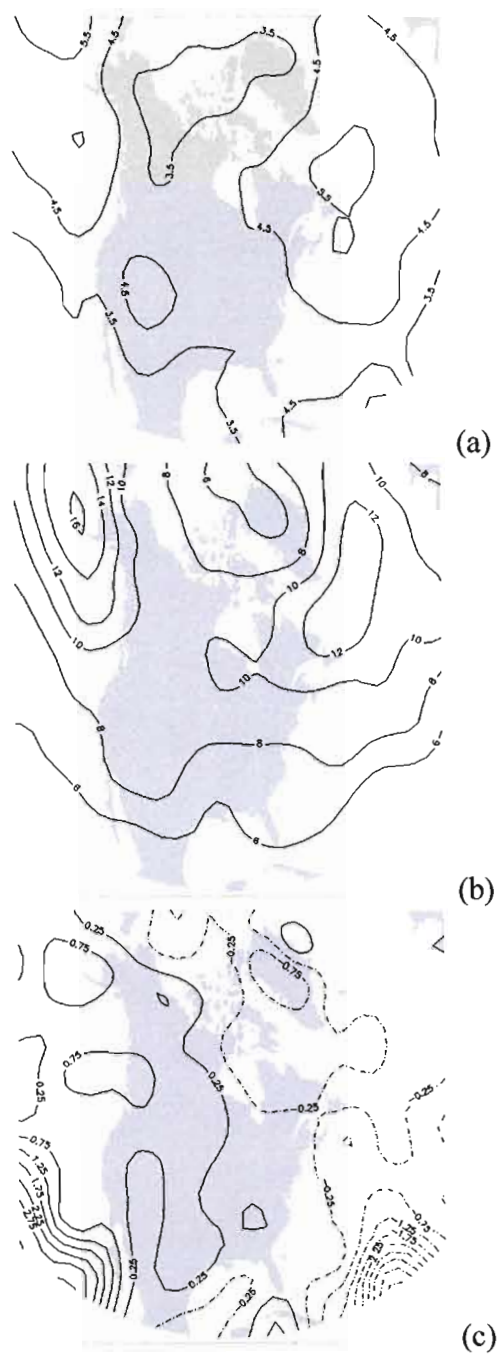


Figure C.1.4 : ζ_{gr} caractéristique pour novembre, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

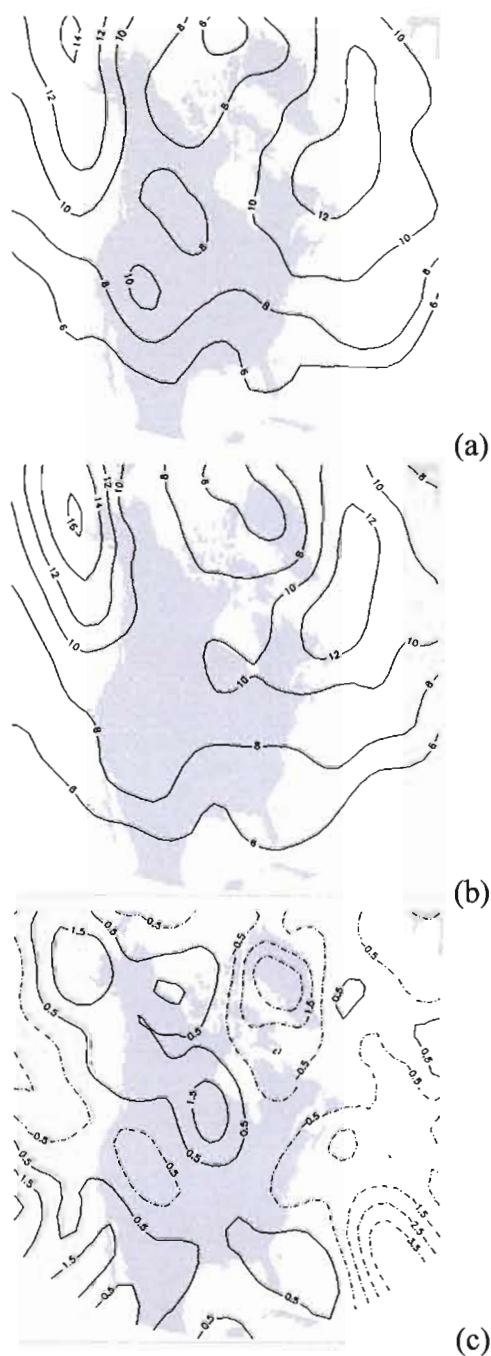


Figure C.1.5 : C_{gr} caractéristique pour novembre, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $1 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

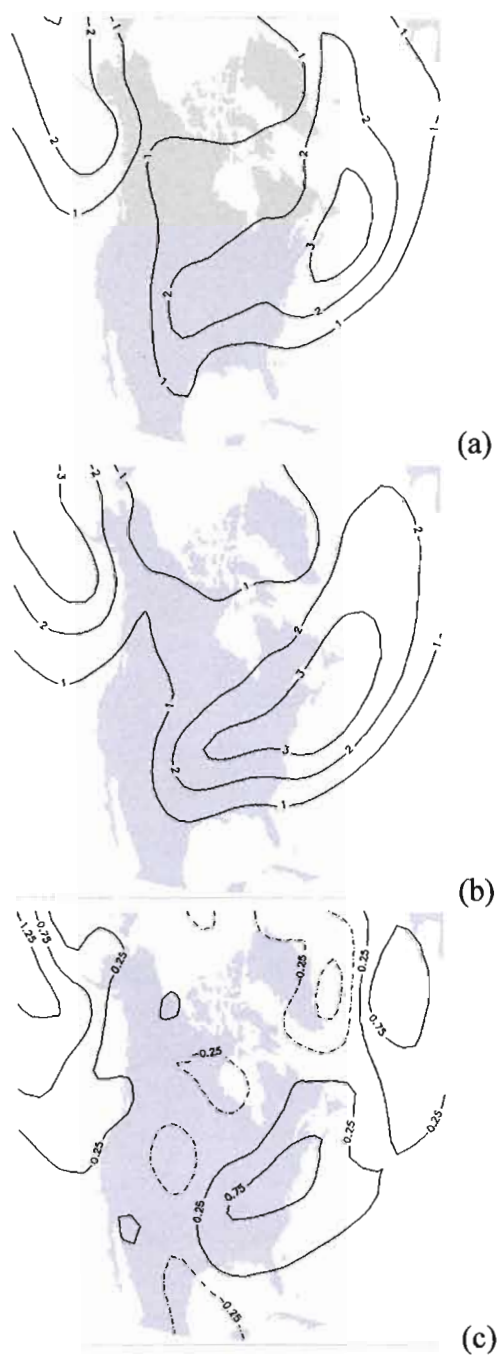


Figure C.2.1 : Moyenne de la densité des trajectoires des cyclones en avril, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par cercle de rayon de 333 km, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

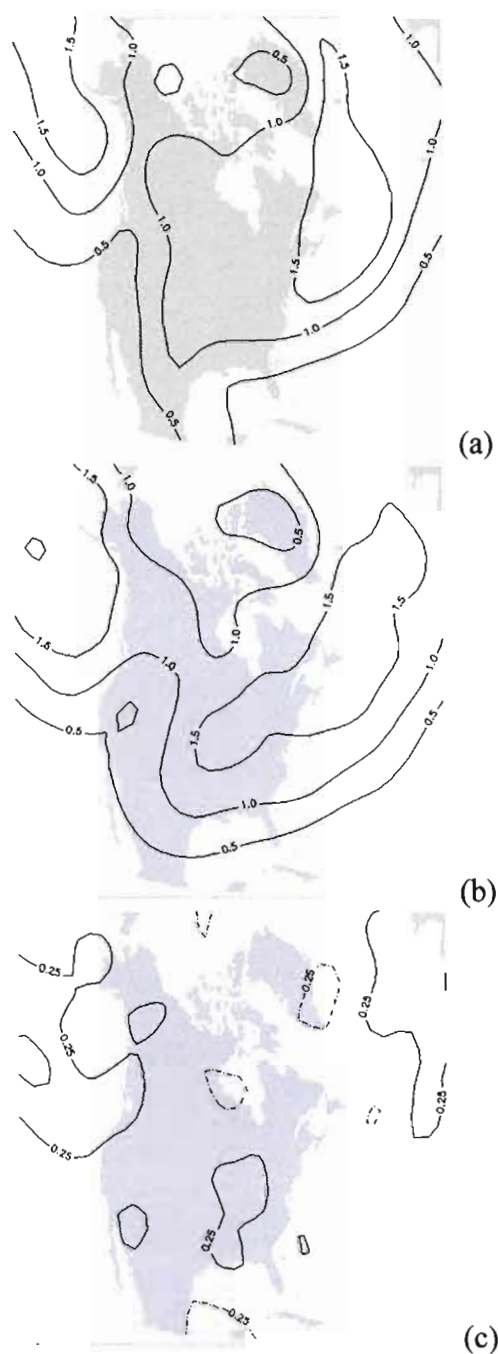


Figure C.2.2 : Variabilité interannuelle représentée par l'écart-type de la densité des trajectoires des cyclones en avril, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b)MCCG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à l'intervalle de 0,5 trajectoire par cercle de rayon de 333 km par mois, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

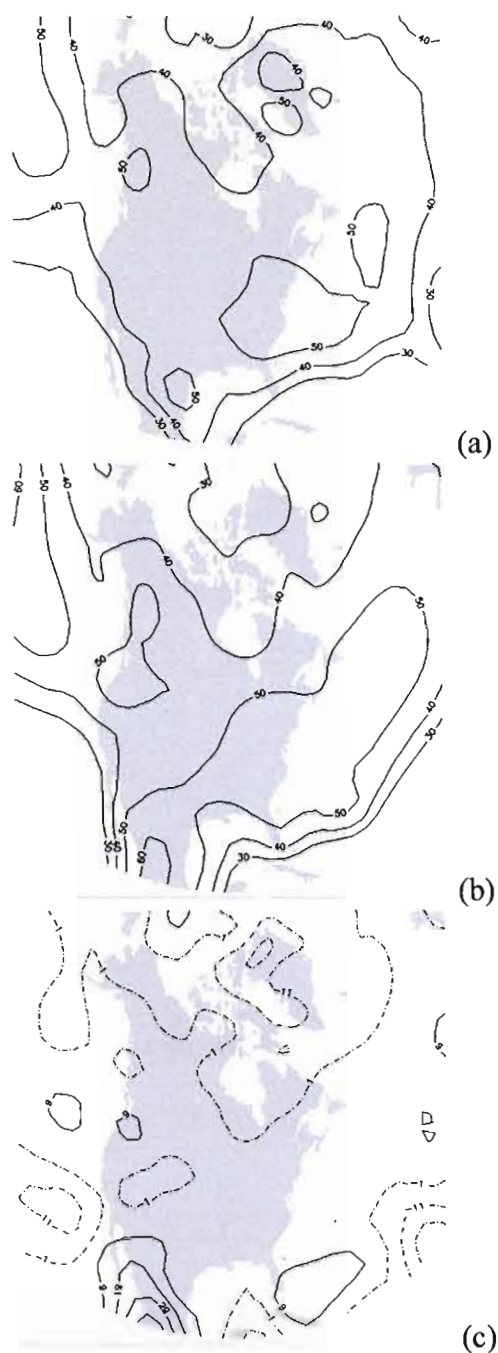


Figure C.2.3 : V_{cyc} caractéristique pour avril, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les 10 km h⁻¹ à travers cercle de rayon de 333 km pour (a) et (b), et à tous les 5 km h⁻¹ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

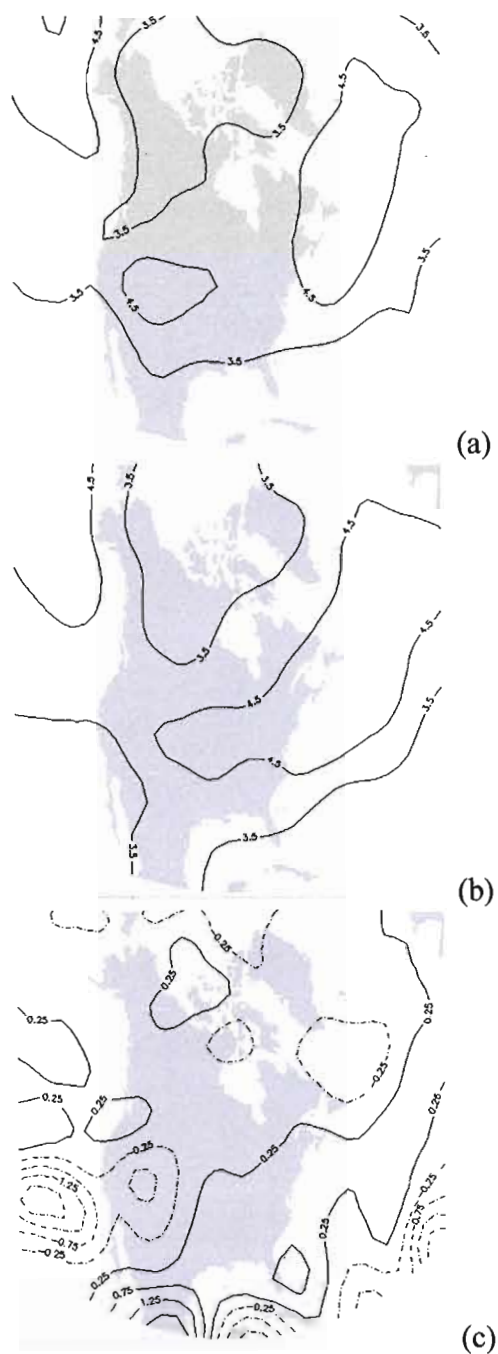


Figure C.2.4 : ζ_{gr} caractéristique pour avril, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG3, (c) différence entre (b) et (a); pour avril : (d)-(f). Les contours sont tracés à chaque $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, avec les valeurs négatives en traits tiretés.

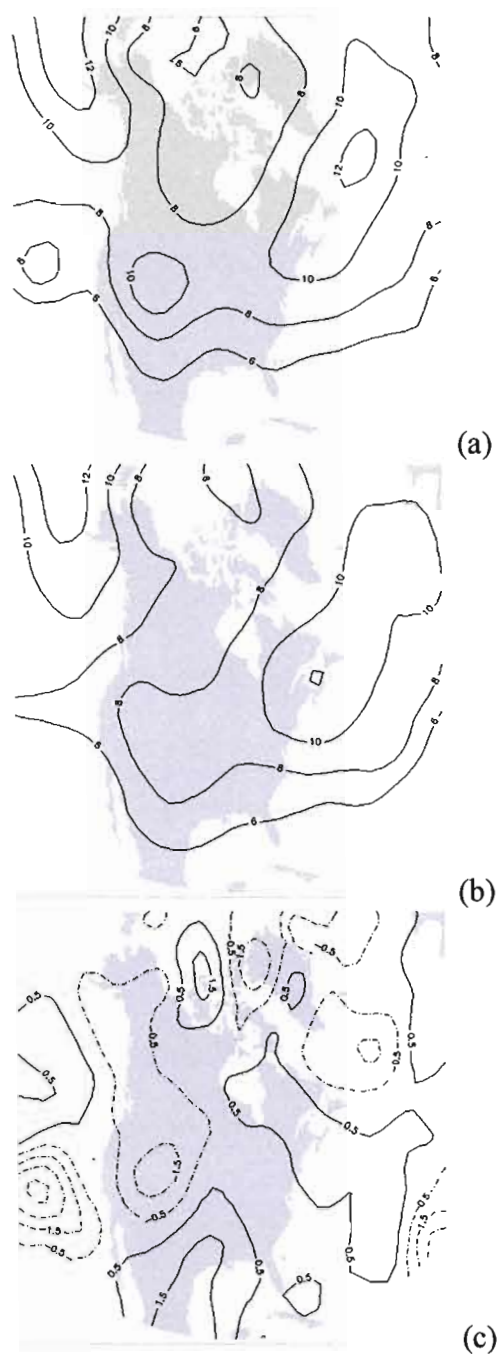


Figure C.2.5 : C_{gr} caractéristique pour avril, 1961 à 1990 : (a) ERA-40, (b) MCGG3, (c) différence entre (b) et (a). Les contours sont tracés à tous les $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (a) et (b), et à chaque $1 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour (c), avec les valeurs négatives en traits tiretés.

APPENDICE D

Northern Hemisphere extra-tropical cyclone activity in 1961-1990: Comparison of the CGCM3 with the NCEP/NCAR reanalyses

Milka Radojevic, Peter Zwack and René Laprise*

Department of Atmospheric Sciences, UQÀM, Montréal, Québec, Canada

La présente annexe représente une première contribution au rapport de l'année 2006 du Research activities in Atmospheric and Oceanic Modelling WMO/TD edited by J. Côté. La validation du MCGG3 avec les ré-analyses NCEP/NCAR a été effectuée à travers la valeur moyenne et la variabilité interannuelle de la densité des trajectoires des cyclones hivernaux (novembre à avril). Le travail est effectué pour la période de 1961 à 1990. Les résultats montrent que le MCGG3 correctement reproduit les cyclones en surestimant légèrement les statistiques prises en considération.

* RIP (1945–2005)

INTRODUCTION

Extra-tropical cyclonic circulation systems induce substantial transport of water vapour, heat and momentum, thus contributing to the maintenance of the time-averaged general circulation of the atmosphere. General circulation models (GCMs) are useful tools for studying a wide range of interacting physical processes that characterize the climate system. Comparison of model simulations with observations provides insights that can aid interpretation of climate variability and future climate-change projections.

The goal of this study is to assess the degree to which the third generation of the Canadian Coupled (atmosphere-ocean) General Circulation Model (CGCM3) replicates extra-tropical cyclone behaviour in the recent climate. An analysis approach was used to identify and track extra-tropical cyclones, and then to compare their statistics over a 30-year period. The statistical method used here includes the computation and mapping of climatological seasonal or monthly means and their standard deviations for various measures of cyclonic activity.

The use of cyclone system climatology for validation is based on the automated objective synoptic systems identification and tracking algorithm of Sinclair (1994, 1997), who was adapted at UQÀM by Rosu (2005). Cyclones are here identified as local maxima of gradient-wind vorticity (ζ_{gr}) computed as the Laplacian of the gridded 1000-hPa geopotential. The use of vorticity captures preliminary stages of large-scale cyclones that would not be detected as pressure minima. Only centres poleward of 20° latitude are included because the gradient wind approximation is not valid close to the equator.

METHODOLOGY

The tracking procedure follows the scheme of Murray and Simmonds (1991a). Tracking attempts to match cyclones at a time with centres at the next analysis time, 6 h later. The chosen combination of matches is one that minimizes a weighted sum of absolute departures of location, pressure, and vorticity from extrapolated values. In order to locate cyclone centres accurately between grid points, a bicubic spline interpolation has been employed. A Cressman filter (see Sinclair, 1997) was applied several times through the algorithm.

The CGCM3 uses the same ocean component as the earlier version, but a new updated atmospheric component, AGCM3. It is a spectral model with triangular truncation at wave number 47 and 32 levels in the vertical on hybrid coordinates. For this study, model data were first interpolated to pressure levels on a 2.5° lat \times 2.5° long grid. The 1000-hPa geopotential was calculated from the model's orography, surface pressure and temperature fields.

The observation-based data used for the comparison/validation are the National Centers for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalyses. The 1000-hPa geopotential from the NCEP/NCAR reanalyses was available on a $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ latitude-longitude grid. Model and reanalysis data covering the period 1960 to 1990, four times per day, were then interpolated on a northern hemispheric polar-stereographic grid (97×97 points) with a spacing of 180 km at 60° lat.

The algorithm provides information about each cyclone track for a selected period (month, season): date/time, number of centres, their location, and the corresponding ζ_{gr} , cyclonic circulation, and associated precipitable water vapour who is introduced in the algorithm during this study.

In order to eliminate weak perturbations and quasi stationary centres from the cyclone statistics, we imposed following conditions: 1) threshold of ζ_{gr} is $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 2) minimum track lifetime is one day, 3) total track length is at least of 1200 km, and 4) minimal distance between final and initial track positions is at least of 600 km.

The measure of cyclone distribution presented here is track density, defined as the number of discrete cyclone tracks passing within 333 km of any grid point. It is obtained by counting the centres just once per track per grid point. This requires cyclones positions to be related into tracks. Because of the overlapping area(s) between neighbouring search circles, one cyclone track may be taken into account at several grid points at the same time.

DISCUSSION AND RESULTS

Fig. 1 shows the NH geographical distribution of the climatological mean of cyclone track density from November to April (NDJFMA). The NCEP/NCAR reanalyses (Fig. 1a) reveal two regions of pronounced maxima. The first extends from Japan toward the Gulf of Alaska, while the second extends from the Great Lakes and North American East Coast, across the North Atlantic and into Sub-Arctic Ocean. Secondary maxima occur over the northern Eurasia and the Gulf of Genoa. Comparison with the results from the CGCM3 (Fig. 1b) confirms this general picture of cyclonic activity, but with a slight under-estimation in the polar region and a larger over-estimation in the oceanic regions of maxima (see Fig. 1c).

Fig. 2 shows the NH geographical distribution of the standard deviation of seasonal-mean cyclone track density for the same period. Results from CGCM3 (Fig. 2b) show a great similarity to those of NCEP/NCAR reanalyses (Fig. 2a). The

greatest interannual variability of the track density around the seasonal-mean climatological average occurs in the preferred cyclone regions such as Iceland, the Gulf of Genoa and the East China Sea. The main differences between two distributions of variability (Fig. 2c) occur in the same regions as those seen in the means.

Therefore, in comparison with the NCEP/NCAR reanalyses, the CGCM3 simulations reproduce well the statistics of extra-tropical mobile cyclones, with slightly larger averages of winter season track density (Table 1) and their variability.

NCEP/NCAR	CGCM3
24 183	24 260

Table 1 : Total number of cyclone tracks over the 30 extended winter seasons (NDJFMA, 1960/61 to 1989/90)

References

- Murray, R. J., and I. Simmonds, 1991: A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: development and operation of the scheme. *Aust. Met. Mag.*, 39, 155 – 166.
- Rosu, C., 2005 : Les caractéristiques des cyclones et l'apport d'eau dans les bassins versants du Québec, Master Thesis, Department of Atmospheric Sciences Montréal, UQAM, 132 pp.
- Sinclair, R. M., 1994: An objective climatology for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 122, 2239 – 2256.
- Sinclair, R. M., 1997: Objective identification of cyclones and their circulation, intensity, and climatology, *Weather and Forecasting*, 12, 595 – 612.

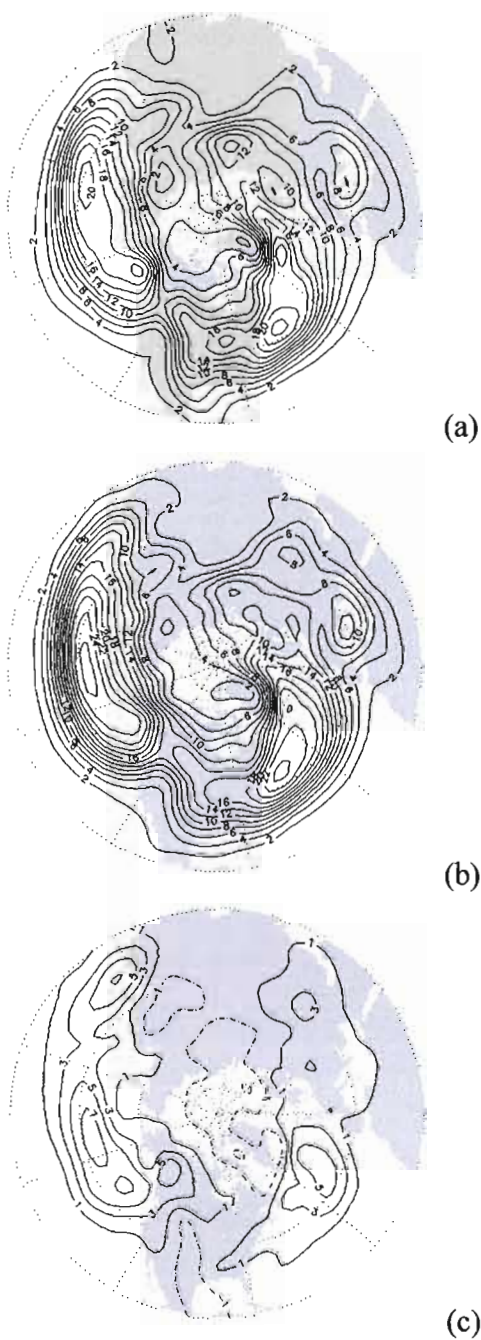


Fig. 1. Mean of extended winter season (NDJFMA) cyclone track density for the NH. Contour interval every 2 centres per 333 km circle per season. (a) NCEP/NCAR, (b) CGCM3 and (c) Difference CGCM3 minus NCEP/NCAR (solid lines for positive differences and dashed lines for negative differences).

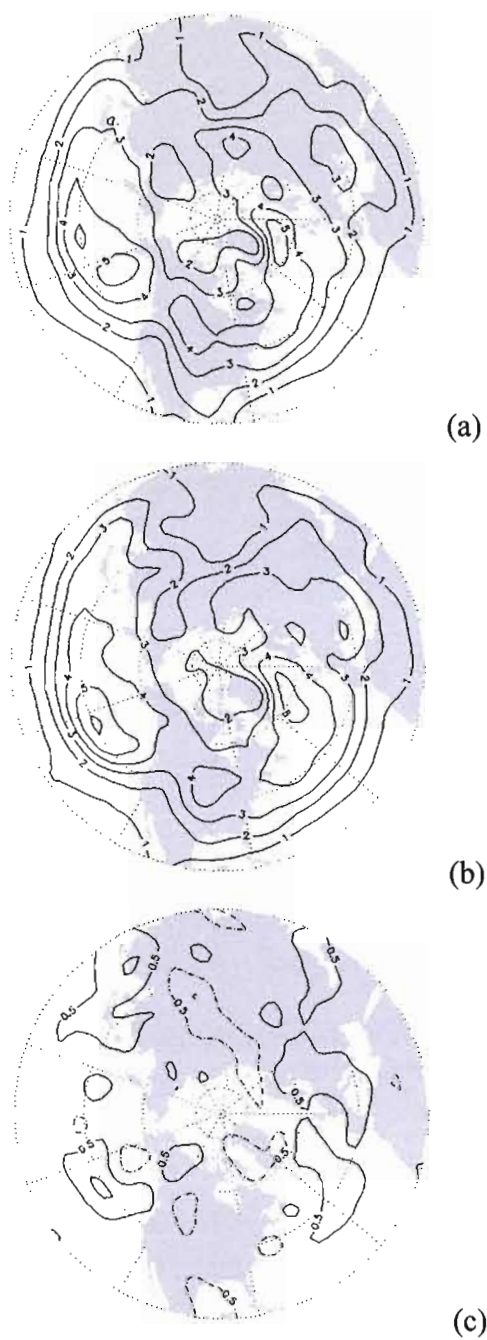


Fig. 2. As above, but for the standard deviation of seasonal mean cyclone track density. Contour interval every 1 centre per 333 km circle per season for (a), (b) and (c).

APPENDICE E

Impact of enhanced greenhouse gases on Northern Hemisphere extra-tropical cyclone activity in 2041-2070 as simulated by the CGCM3

Milka Radojevic, Peter Zwack and René Laprise*

Department of Atmospheric Sciences, UQÀM, Montréal, Québec, Canada

La présente annexe représente une deuxième contribution au rapport de l'année 2006 du Research activities in Atmospheric and Oceanic Modelling WMO/TD edited by J. Côté. Les climatologies des cyclones dans l'hémisphère Nord ont été calculées à partir des simulations du MCGG3 pour la période de 1961 à 1990, et des projections du MCGG3, 2041 à 2070. Les climatologies de la densité des cyclones, de la densité des cyclones intenses (la valeur centrale de ζ_{gr} plus grande ou égale à 6 CVU) et de la densité de cyclogenèse sont analysées pour les 3 mois d'hiver (décembre à février) ainsi que pour les 3 mois d'été (juin à août). En cas de doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, qui pourrait être atteint dès 2050, l'activité des cyclones migratoires diminue légèrement aux latitudes moyennes et augmente aux hautes latitudes près des continents.

* (1945–2005)

INTRODUCTION

General circulation model (GCM) projections indicate that enhanced greenhouse gases (GHG) will result in a warming of the lower troposphere particularly, in the polar regions, in winter, over the continents. The reduction of the pole to equator low-level temperature gradient is expected to influence the distribution of extra-tropical cyclones. The goal of this study is to investigate the possible effect of increasing GHG on the climatology of NH extra-tropical migratory cyclones using the simulations of the third-generation Canadian Coupled (atmosphere-ocean) General Circulation Model (CGCM3).

METHODOLOGY

An analysis approach is used here to identify and track extra-tropical cyclones, and then to compare their seasonal statistics over a 30-year model simulation. The cyclone climatology is based on the automated objective synoptic systems identification and tracking algorithm, developed by Sinclair (1997). Cyclones are here identified as local maxima of gradient-wind vorticity (ζ_{gr}) computed as the Laplacian of the gridded 1000-hPa geopotential (for more details, see the companion contribution on the CGCM3 validation in this book).

The atmospheric component of CGCM3 is a spectral model with triangular truncation at wave number 47, and with 32 levels in the vertical on hybrid coordinates. The model projection under investigation corresponds to the period 2040 to 2070, with the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emissions Scenarios (IPCC SRES) A2 scenario forcing. The control simulation covers the period 1960 to 1990.

In order to eliminate weak perturbations and quasi-stationary centres from the cyclone statistics, we imposed following conditions: 1) threshold of ζ_{gr} is $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 2) minimum track lifetime is one day, 3) total track length is at least of 1200 km, and 4) minimal distance between final and initial track positions is at least of 600 km. The cyclone centre density is defined as the number of discrete cyclone centres passing within 333 km of any grid point. Because of the overlapping area(s) between neighbouring search circles, one cyclone centre may be taken into account at several grid points at the same time. A cyclone is considered as intense if its central ζ_{gr} is at least $6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. The location of cyclone genesis and lysis corresponds to the initial and final track positions, respectively.

DISCUSSION AND RESULTS

According to the results shown in the Table 1, the total number of both, cyclone occurrences and cyclone tracks, over the 2040-70 period, is slightly reduced, by about 2%, compared to the control run. Thus, it seems that the enhanced- CO_2 climate is less favourable for the extra-tropical cyclones formation.

Since the geographical distribution of the frequency of cyclone genesis density remains mainly unchanged under the warmer climate, only the results from the control run and the differences are presented (Fig. 1). In winter (DJF), genesis maxima are located along southern part of the North Pacific, east of the Rocky Mountains, the North American East Coast and the Tyrrhenian Sea (Fig. 1a). During the summer (JJA), the genesis maxima are shifted north-eastward (Fig. 1c). In the warmer climate, the cyclone density becomes less frequent everywhere on the NH, in the winter (Fig. 1b) as in the summer (Fig. 1d).

The NH winter frequency of cyclone density in the enhanced- CO_2 climate (Fig. 2a.1), is shifted northward in the north-eastern Canada (the Nunavut Territory) and in the Mediterranean Sea, and is reduced in the Gulf of Genoa, compared to the control climate (Fig. 2b.1). The greatest winter frequency of density of intense cyclones, extending from the Japan to the Gulf of Alaska, shows a minor eastward shift (Fig. 2d.1) in comparison with the control climate (Fig. 2e.1). During the NH summer, there is no change in the cyclone density as in the density of intense cyclones (Fig. 2d.2 and Fig. 2e.2). There are no significant changes in the other averaged cyclone characteristics such as lifetime, speed, central ζ_{gr} , cyclone circulation and precipitable water vapour.

In the enhanced- CO_2 climate, generally, the activity of the NH extra-tropical mobile cyclones slightly decreases in the mid-latitudes, while it increase in the high latitudes near the continents (Fig. 2c.1, 2f.1, 2c.2 and 2f.2). The results here confirm overall those of Lambert and Fyfe (2006).

Reference

- Sinclair, R. M., 1997: Objective Identification of Cyclones and Their Circulation Intensity, and Climatology. *Weather and Forecasting*, 12, 595 – 612
- Lambert, S.J., and J.C. Fyfe, 2006: Changes in Winter Cyclone Frequencies and Strengths Simulated in Enhanced Greenhouse Warming Experiments: Results from the Models Participating in the IPCC Diagnostic Exercise. *Climate Dynamic* (in press).

(The web site : www.cccma.bc.ec.gc.ca/models, consulted on March 2006)

	Control run: 1960–1990	Enhanced- CO_2 run: 2040–2070
Winter (December–February)	146 672 (11 919)	143 932 (11 627)
Summer (June–August)	137 982 (12 418)	134 282 (12 184)

Table 1 : Total number of NH extra-tropical cyclone occurrences (**tracks**), poleward of 20°N , over the 30 winters and summers.

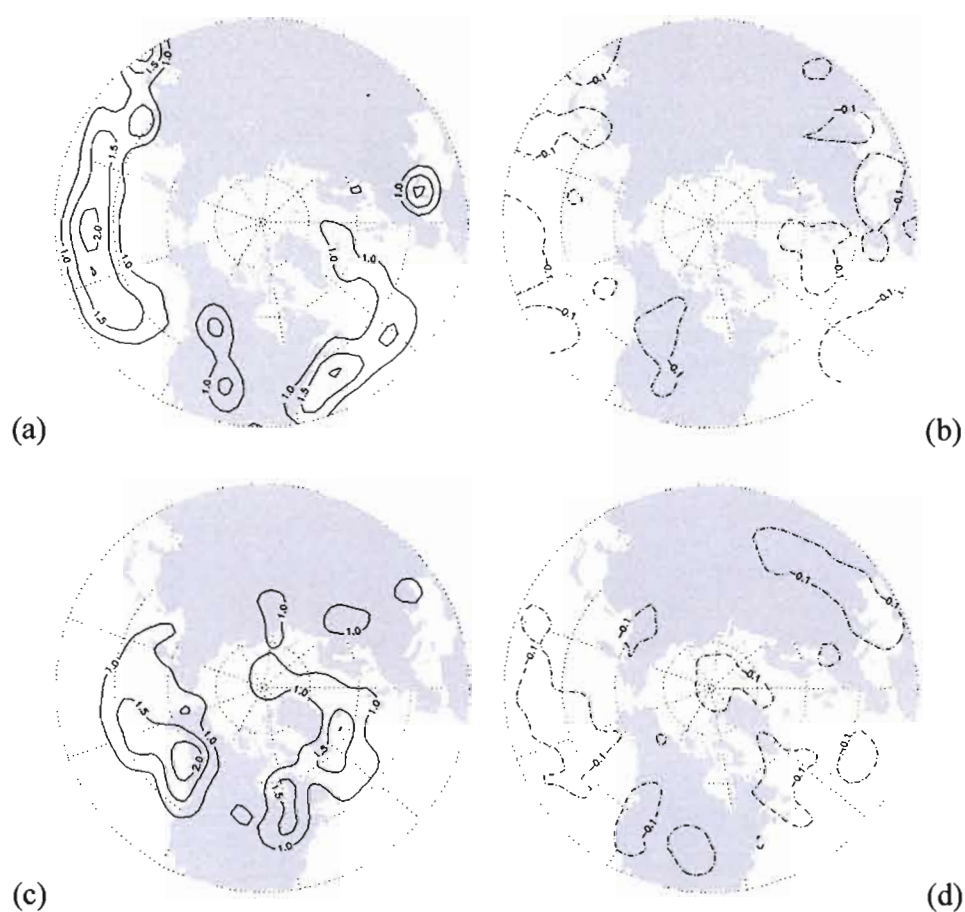


Fig. 1. Mean of extended NH winter (DJF) cyclogenesis density for (a) control, (b) enhanced- CO_2 minus control; (c)-(d) as for (a) and (b) except for the summer (JJA). Contour interval every 0.5 centre per 333 km circle per season for (a)-(d). Solid lines for positive differences and dashed lines for negative differences.

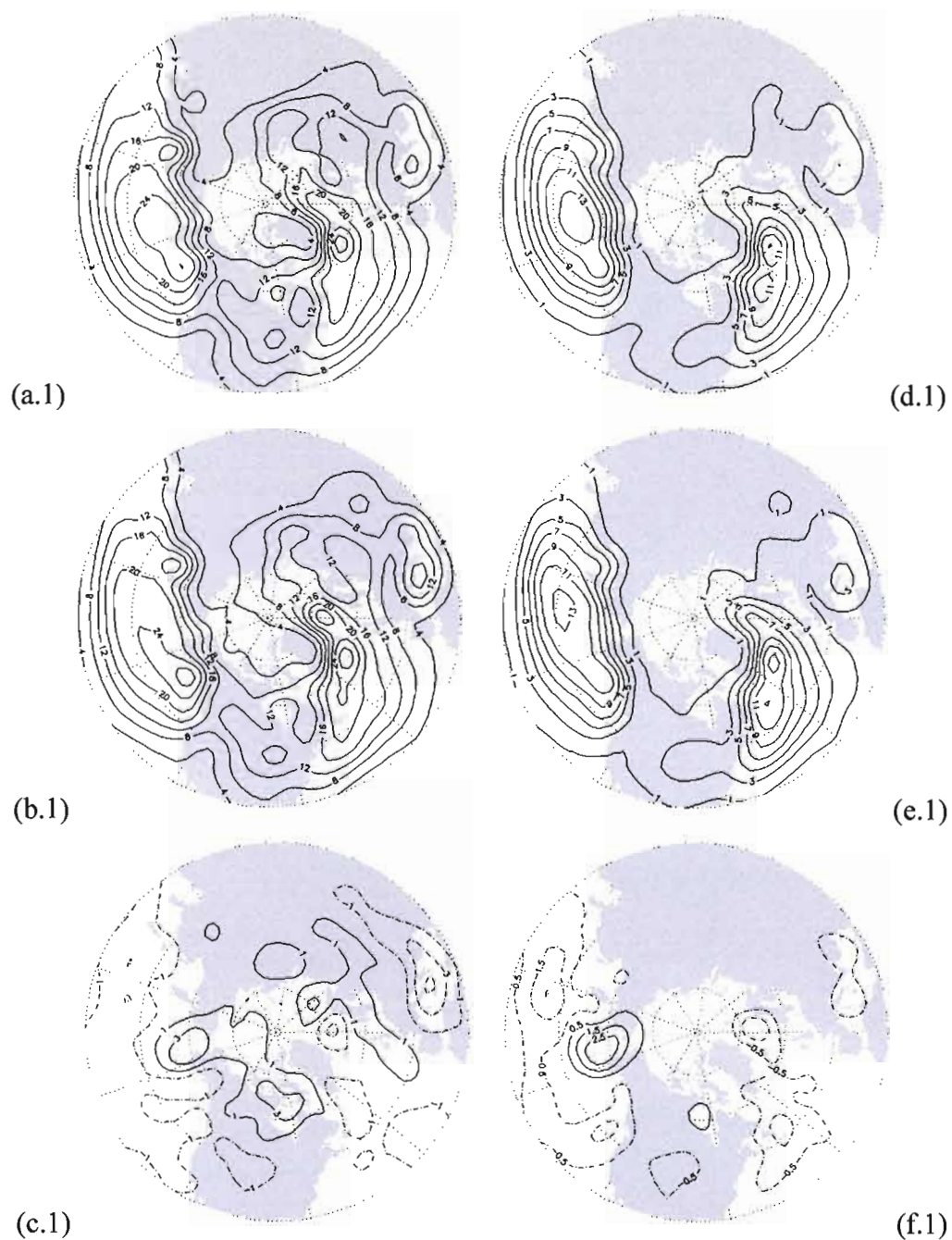


Fig. 2. Mean of NH winter (DJF) cyclone density for (a.1) enhanced-CO₂, (b.1) control and (c.1) enhanced-CO₂ minus control, respectively; (d.1)-(f.1) as for (a.1)-(c.1) except for the intense cyclones; Contour interval every 4 centres for (a.1) and (b.1), every 2 centres for (c.1), (d.1) and (e.1), and every 1 centre for (f.1), per 333 km circle per season. Solid lines for positive differences and dashed lines for negative differences.

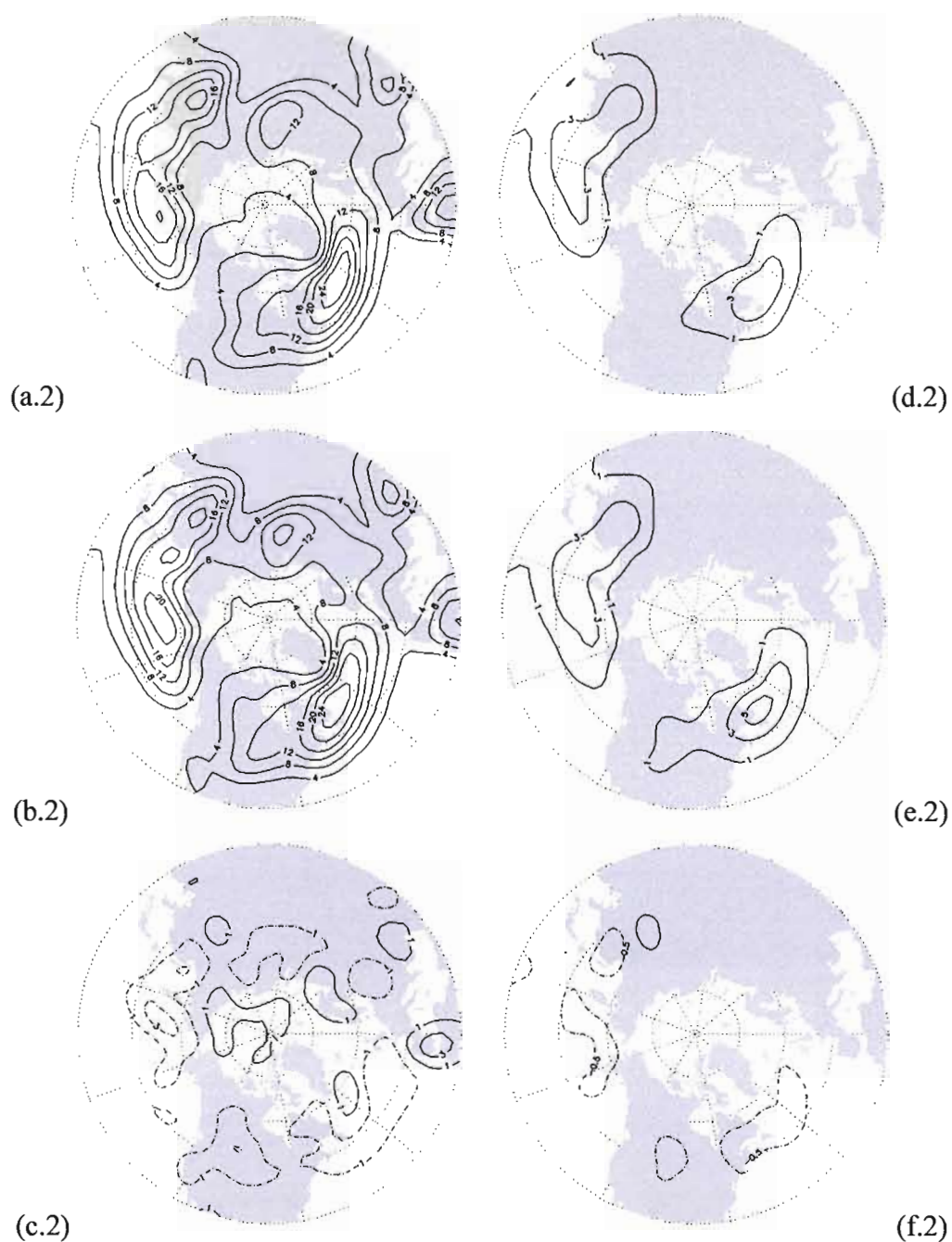


Fig. 2. Mean of NH winter (DJF) cyclone density: (a.2)-(c.2) as for (a.1)-(c.1) except for summer (JJA); (d.2)-(f.2) as for (d.1)-(f.1) except for the summer (JJA). Contour interval every 4 centres for (a.2) and (b.2), every 2 centres for (c.2), (d.2) and (e.2), and every 1 centre for (f.2), per 333 km circle per season. Solid lines for positive differences and dashed lines for negative differences.

BIBLIOGRAPHIE

- Bengtsson, L., K. Hodges and S. Hagemann, 2004 : Sensitivity of the ERA40 Re-analysis to the observing system: Determination of the global atmospheric circulation from reduced observations, *Tellus*, **56A**, 456–471
- , ----- and E. Roeckner, 2006 : Storm tracks and climate change, soumis au *Journal of Climate*
- Blender R., K. Fraedrich and F. Lunkeit, 1997 : Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **123**, 727–741
- Brayshaw, D., 2005 : Storm tracks under climate change, Le titre présenté à Bern Young Scientist Summit and its **impact** on Cities 2005. (Source : www.met.rdg.ac.uk/~swr03djb/bern2005/)
- Cao, Z. and D. Zhang, 2004 : Tracking Surface Cyclones with Moist Potential Vorticity, *Advances in Atmospheric Sciences*, **21**, 830–835
- Erasmus, D.A. and M. Sarazin, 2000 : Forecasting Precipitable Water Vapour and Cirrus Cloud Cover For Astronomical Observatories : Satellite image processing guided by synoptic model dissemination data, *PIE Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing*, IV Paper, SPIE-4168, Barcelona, 25–29
- Flato, G.M. and G.J. Boer, 2001 : Warming asymmetry in climate change simulations, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 195–198
- Gaffney, S. J., A. W. Robertson, P. Smith, S. J. Camarago and M. Ghill, 2005 : Probabilistic Clustering of Extratropical Cyclones Using Regression Mixture Models, soumis au *Mon. Wea. Rev.*
- Gang, Q. and M. Sugi, 2002 : Possible Change of Extratropical Cyclone Activity due to Enhanced Greenhouse Gases and Sulfate Aerosols Study with a High-Resolution AGCM, *Journal of Climate*, **16**, 2262–2274
- Hodges, K. I., 1994 : A General Method for Tracking Analysis and Application to Meteorological Data, *American Meteorological Society*, **122**, 2573–2586

- , 1995 : Feature tracking on the Unit Sphere, *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3458–3465
- , 1996 : Spherical Nonparametric Estimators Applied to the UGAMP Model Integration for AMIP, *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2914–2932
- , 1999 : Adaptive Constraints for Feature Tracking, *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1362–1373
- Hurrell, J. W. and H. Van Loon, 1997 : Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation, *Climate Change*, **36**, 301–326
- IPCC, 2001 : *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. J.T. Houghton et al. (eds.), Cambridge University Press, 881 pp.
- Källberg, P. Berrisford, B. Hoskins, A. Simmons, S. Uppala, S. Lamy-Thépaut and R. Hine 2005 : ERA-40 : Project report Series No. 19, ECMWF, Shinfield Park, Reading, England
- König, W., R. Sausen and F. Sielmann, 1993 : Objective identification of Cyclones in GCM Simulations, *Journal of Climate*, Vol. **6**, 2217–2231
- Lambert, S. J., 1988 : A Cyclone Climatology of the Canadian Climate Centre General Circulation Model, *Journal of Climate*, **1**, 109–115
- , 1995 : The Effect of Greenhouse Warming on Winter Cyclone Frequencies and Strengths, *Journal of Climate*, **8**, 1447–1452
- , 1996 : Intense extratropical northern hemisphere winter cyclone events : 1899–1991, *Journal of Geophysical Research*, **10**, 21319–21325
- , J. Sheng and J. Boyle, 2002 : Winter cyclone frequencies in thirteen models participating in the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP1), *Climate Dynamics*, **19**, 1–16
- , 2004 : Changes in Winter cyclone Frequencies and Strengths in Transient Enhanced Greenhouse Warming Simulations Using Two Coupled Climate Models, *Atmosphere-Ocean*, **42 (3)**, 173–181
- and J.C. Fyfe, 2006 : Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse gas experiments: Results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise, *Climate Dynamics*, sous presse

- Laprise, R. et P. Zwack, 1992 : Variations de l'activité cyclonique dans un scénario double CO₂, *Le Climat*, **10** (2), 39–62
- McCabe, G. J., M. P. Clark and M. C. Serreze, 2001 : Trends in Northern Hemisphere Surface Cyclone Frequency and Intensity, *Journal of Climate*, Vol. 14, No. **12**, 2763–2768
- Murray, R. J. and I. Simmonds, 1991a : A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data Part I : developement and operation of the sheme, *Aust. Met. Mag.*, **39**, 155–166
- Muskulus, M. and D. Jacob, 2005 : Tracking cyclones in regional model data : the future of Mediterranean storms, *Advances in Geosciences*, **2**, 13–19
- Paciorek, C. J., J. S. Risbey, V. Ventura and R. D. Rosen, 2002 : Multiples Indices of Northern Hemisphere Cyclone Activity, Winters 1949-99, *Journal of Climate*, **15**, 1573–1590
- Raible, C. C. and R. Blender, 2004 : Northern Hemisphere midlatitude cyclone variability in GCM simulations with different ocean representations, *Climate Dynamics*, **22**, 239–248
- Rosu, C., 2005 : Les caractéristiques des cyclones et l'apport d'eau dans les bassins versants du Québec, *Mémoire de maîtrise en Sciences de l'atmosphère*, Université du Québec à Montréal, 118 pp.
- Schubert, M., J. Perlwitz, R. Blender, K. Fraedrich and F. Lunkeit, 1998: North Atlantic cyclones in CO₂-induced warm climate simulations : frequency, intensity, and tracks, *Climate Dynamics*, **14**, 827–837
- Serreze, M. C., F. Carse and R.G. Barry, 1997 : Icelandic Low Cyclone Activity : Climatological Features, Linkage with the NAO, and Relationships with Recent Changes in the Northern Hemisphere in the Northern Hemisphere Circulation, *Journal of Climate*, **10**, 453–463
- Sickmöller, M., R. Blender and K. Fraedrich, 2000 : Observed winter cyclone tracks in the northern hemisphere in re-analysed ECMWF data, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **126**, 591–620
- Simmonds, I. and K. Keay, 1999 : Variability of Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behavior, 1958–97, *Journal of Climate*, **13**, 55–651
- Sinclair, R. M., 1994 : An Objective Climatology for the Southern Hemisphere, *Monthly Weather Review*, **122**, 2239–2256

- , 1997 : Objective Identification of Cyclones and Their Circulation Intensity, and Climatology, *Weather and Forecasting*, **12**, 595–612
- and G. I. Watterson, 1999 : Objective Assessment of Extratropical Weathers Systems in Simulated Climates, *Journal of Climate*, **12**, 3465–3485
- and M. J. Revell, 2000 : Classification and Composite Diagnosis of Extratropical Cyclogenesis Events in the Southwest Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1089–1105
- 2003 : Storm Track Activity and its Recent Trend as Deduced from Explicit Tracking, Le titre d'une conférence présentée à l'Université du Québec à Montréal, l'août, 2003 (Source : meteo.pr.erau.edu/sinclair/sinclair.html)
- Trigo, I. F. and Davies T. D., 1999 : Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region, *Journal of Climate*, Vol. **12**, No. 6, 1685–1696
- Verseghy, D. L., N. A. McFarlane and M. Lazare, 1993: A Canadian Land Surface Scheme for GCMs:II. Vegetation model and coupled runs. *Int. J. Climatol.*, **13**, 347–370
- Wile, K. L., 2005 : Differences in the frequency and distribution of intense extratropical cyclone events in a model-simulated doubled CO₂ environment, (Source : ams.confex.com/ams/pdfpapers/102440.pdf)
- Wernli, H. and C. Schwierz, 2005 : Surface cyclones in the ERA40 data set (1958–2001). Part 1: novel identification method and global climatology, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **63**, 2486–2507
- Yin J. H., 2005 : A consistent Poleward Shift of the Storm Tracks in Simulations of 21st Century Climate, *Geophysical Research Letters*, **32**, L18701
- Zhang, Y. and W.-C. Wang, 1997 : Model-Simulated Northern Winter Cyclone and Anticyclone Activity under a Greenhouse Warming Scenario, *Journal of Climate*, **10**, 1616–1634
- , J. M. Wallace and D.S. Battisti, 1997 : ENSO-like interdecadal variability, 1900–93, *Journal of Climate*, **10**, 1004–102